

Bijlage F Onderzoek Schinkelbruggen

ONGERUBRICEERD

Oude Waalsdorperweg 63
2597 AK Den Haag
Postbus 96864
2509 JG Den Haag

www.tno.nl

T +31 88 866 10 00
F +31 70 328 09 61

TNO-rapport**TNO 2015 R11677****Geluidonderzoek maatregelen Schinkelbrug A10**

Datum	januari 2016
Auteur(s)	ir. M.G. Dittrich ir. H.W. Jansen ing. F. Staats dr.ing. R. Müller
Exemplaarnummer	
Oplage	9
Aantal pagina's	67 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	2
Opdrachtgever	De heer E. Ivens Projectorganisatie Zuidasdok WTC B-toren, 10e verdieping Strawinskylaan 1029 1077 XX AMSTERDAM
Projectnaam	Geluidanalyse Schinkelbrug
Projectnummer	060.18989

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2016 TNO

ONGERUBRICEERD

Samenvatting

Naar aanleiding van klachten van geluidhinder bij woonboten vlakbij de Amsterdamse Schinkelbrug op de A10 en de evaluatie van het Ontwerp Tracébesluit, heeft TNO op verzoek van projectorganisatie Zuidasdok een referentie- en diagnose meting uitgevoerd en geanalyseerd welke geluid-reducerende maatregelen mogelijk effectief kunnen zijn voor de huidige brug en voor een nieuw te bouwen brug naast de bestaande.

Geluidimmissie en de potentiële hinder zijn bij een drietal woningen gekarakteriseerd. Daarnaast is de brugtoeslag bepaald, en is aan de hand van geluid- en trillingsmetingen aan de brug geanalyseerd welke maatregelen zowel de laagfrequente als de middenfrequente hinder kunnen reduceren.

De hinder bij de woningen vlak naast de brug wordt bepaald door zowel het laagfrequente, vaak impulsieve geluid afgestraald door de stalen brug bij zware en middelzware voertuigpassages, als door het rol- en voeggeluid van de brug. Het geluid wordt aan de onderzijde van de brug door de tunnel versterkt waardoor de onderzijde domineert. Woningen op iets grotere afstand hebben vergelijkbare immissie van laagfrequent geluid maar iets lagere dB(A)- niveaus ten gevolge van het geluid van de brugvoegen en brugwegdek. De bijdrage van de brug aan het totale geluid van de A10 draagt steeds minder bij met toenemende afstand en smallere hoek met de weg. De niveaus zijn voldoende hoog om hinder te veroorzaken op alle drie ontvangpunten, met L_C - L_A niveaus van rond de 15 dB bij M1 en M2, tot 20 dB bij M3 en 's nachts bij M1.

Voor de bestaande brug zijn kansrijke maatregelen aanbevolen die in combinatie van 3 tot 7 dB in het ongewogen geluidniveau en 3 tot 8 dB reductie in het dB(A)-niveau kunnen opleveren. Deze maatregelen omvatten:

- Verbeterde ondersteuning van het midden van het brugdek en de consoles aan de oostkant en indien nodig ook de westkant;
- Damping/ontdreuning van de brugplaatdelen, met name de trogprofielen;
- Kapseling van de onderkant of absorberende afscherming aan de zijde van de brug vanaf wegdek tot aan de doorvaarthoogte, eventueel geïntegreerd met het aanwezige beweegbare geluidscherm;
- Lange vingervoegen die de aanstoting van het brugdek reduceren en een vlakker verloop hebben;
- Afsluiting van voegen aan de onderzijde;
- Hoogte-uitlijning van de voegen en het wegdek.

Voor de nieuwe brug worden soortgelijke maatregelen aanbevolen, echter meer geïntegreerd in het ontwerp en met verbeterd ontwerp van de verstijverconfiguratie. Daarnaast kan een schuine voeg worden toegepast. Met combinatie van deze maatregelen worden reducties verwacht van 5 tot 15 dB in het ongewogen niveau en 3 tot 10 dB in het dB(A)-niveau.

De werkelijke reductie in het dB(A)-niveau bij woningen wordt beperkt tot ca. 3 dB door het overige geluid van de snelweg.

De laagfrequente hinder in de nieuwe situatie is terug te brengen tot onder het huidige, als de 'maximale' combinatie van maatregelen optimaal wordt uitgevoerd. Voor het dB(A)-niveau kan een niveau worden bereikt dat vergelijkbaar is met de overige wegdelen, waarbij verkeerstoename mogelijk weer tot een verhoging kan leiden.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	5
1.1	Achtergrond	5
1.2	Doelstelling van het onderzoek	5
2	Situatiebeschrijving en aanvullende gegevens.....	6
2.1	Situatiebeschrijving	6
2.2	Brugconstructie	7
2.3	Gegevens wegdek en voegen	11
3	Diagnostische metingen	12
3.1	Opzet van de metingen	12
3.2	Metingen bij ontvangpunten en naast de brug	13
3.3	Maximumspectra van passages met sterk laagfrequent geluid	25
3.4	Vergelijking van spectra bij de brug en bij het referentiepunt.....	28
3.5	Conclusies	29
3.6	Metingen volgens de brugtoeslagmethode	30
3.7	Geluid- en trillingsmetingen aan de brug.....	32
3.8	Antennemetingen.....	42
3.9	Conclusies uit alle metingen.....	48
4	Analyse van maatregelen	50
4.1	Introductie	50
4.2	Afzonderlijke maatregelen	50
4.3	Kansrijke maatregelen voor de bestaande brug.....	57
4.4	Kansrijke maatregelen aan de nieuwe brug	58
5	Conclusies.....	60
6	Referenties	63
7	Ondertekening	64
	Bijlage(n)	
	Bijlage A Apparatuurlijst	
	Bijlage B Tabellen van spectra	

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Naar aanleiding van klachten van geluidhinder bij woonboten vlakbij de Amsterdamse Schinkelbrug op de A10 en de evaluatie van het Ontwerp Tracébesluit, heeft TNO op verzoek van projectorganisatie Zuidasdok een referentie- en diagnose meting uitgevoerd en geanalyseerd welke geluid-reducerende maatregelen mogelijk effectief kunnen zijn.

De bestaande basculebrug in de westelijke rijrichting van de A10 heeft 5 rijstroken. Er zal naast de huidige brug nog een nieuwe worden gebouwd. Projectorganisatie Zuidasdok heeft gevraagd welke maatregelen voor de bestaande brug en voor de nieuwe brug in aanmerking komen.

De geluidreductie is nodig om de hinder te beperken. De hinder wordt mede bepaald door laagfrequent geluid tijdens passages van zware voertuigen (bussen en trucks), geluid van de voegen en verhoogd rolgeluid afgestraald door de brugconstructie. De ruimte onder de basculebrug versterkt het geluid door reflecties en galm.

1.2 Doelstelling van het onderzoek

Doelstelling van het onderzoek is de huidige situatie te karakteriseren voor wat betreft de hinderbepalende geluidemissie en te analyseren welke maatregelen effectief kunnen zijn. De detaillering van gekozen maatregelen zal in het vervolg op dit project moeten plaatsvinden, met geluidstechnische begeleiding van de uitvoeringsaspecten.

In dit rapport worden de meetresultaten, de analyse en de voorgestelde maatregelen besproken. Er wordt een inschatting gegeven van de mogelijke geluidreductie en hinder in de nieuwe situatie, zowel voor de bestaande brug als de nieuwe brug.

2 Situatiebeschrijving en aanvullende gegevens

2.1 Situatiebeschrijving

De noordelijke Schinkelbrug in de A10 is onderdeel van een complex van beweegbare bruggen over de Schinkel bestaande uit twee snelwegbruggen van Rijkswaterstaat, één brug voor de metro en twee spoorbruggen. Ter hoogte van deze brug splitst het verkeer zich in de A4 richting Schiphol met 3 rijstroken (nummers 1/binnen, 2 en 3) en de richting A10 noordwest met 2 rijstroken (nummers 4 en 5/buiten).

Aan de noordzijde van de brug ligt een gebied met woonboten waar hinder wordt ondervonden. Daarbij is vooral het laagfrequente geluid bij passages van zware voertuigen, maar ook dat van de voegen en het rolgeluid op het brugdek waarneembaar.

De situatie is weergegeven in figuur 1.



Figuur 1: Ligging Schinkelbrug met woonboten aan de noordkant.

De A10 basculebrug (rood omcirkeld in figuur 1) geeft een verhoging van het geluid ten opzichte van de rest van de weg, die mede afhangt van de afstand en zichthoek van de brug. De stalen basculebrug aan de noordzijde produceert een hoger geluidniveau dan het aansluitende weggedeelte door de stalen brugconstructie en voegen in het wegdek. De bruggen gaan alleen 's nachts open rond 23:00 en rond 02:00 in verband met het drukke snelwegverkeer op de A10.

2.2 Brugconstructie

De brug is een stalen basculebrug bestaande uit een verstijfde dekconstructie van 21,2 x 17 m en een contragewicht in de basculekelder aan de westelijke zijde. Een foto van de noordelijke brug staat in figuur 2. Daarin zijn geluidabsorberende cassettes zichtbaar aan de zijwanden van de tunnel. De oplegpunten van de val zijn in figuren 3 en 4 zichtbaar. Een overzichtstekening van de brugconstructie staat in figuur 5.

Het totale gewicht van de val is 17,35 ton inclusief slijtlaag. Het brugdek is 18 mm dik en heeft een zijdelingse helling van 1:50. Gegevens van gewicht en doorbuiging staan in tabel 1.



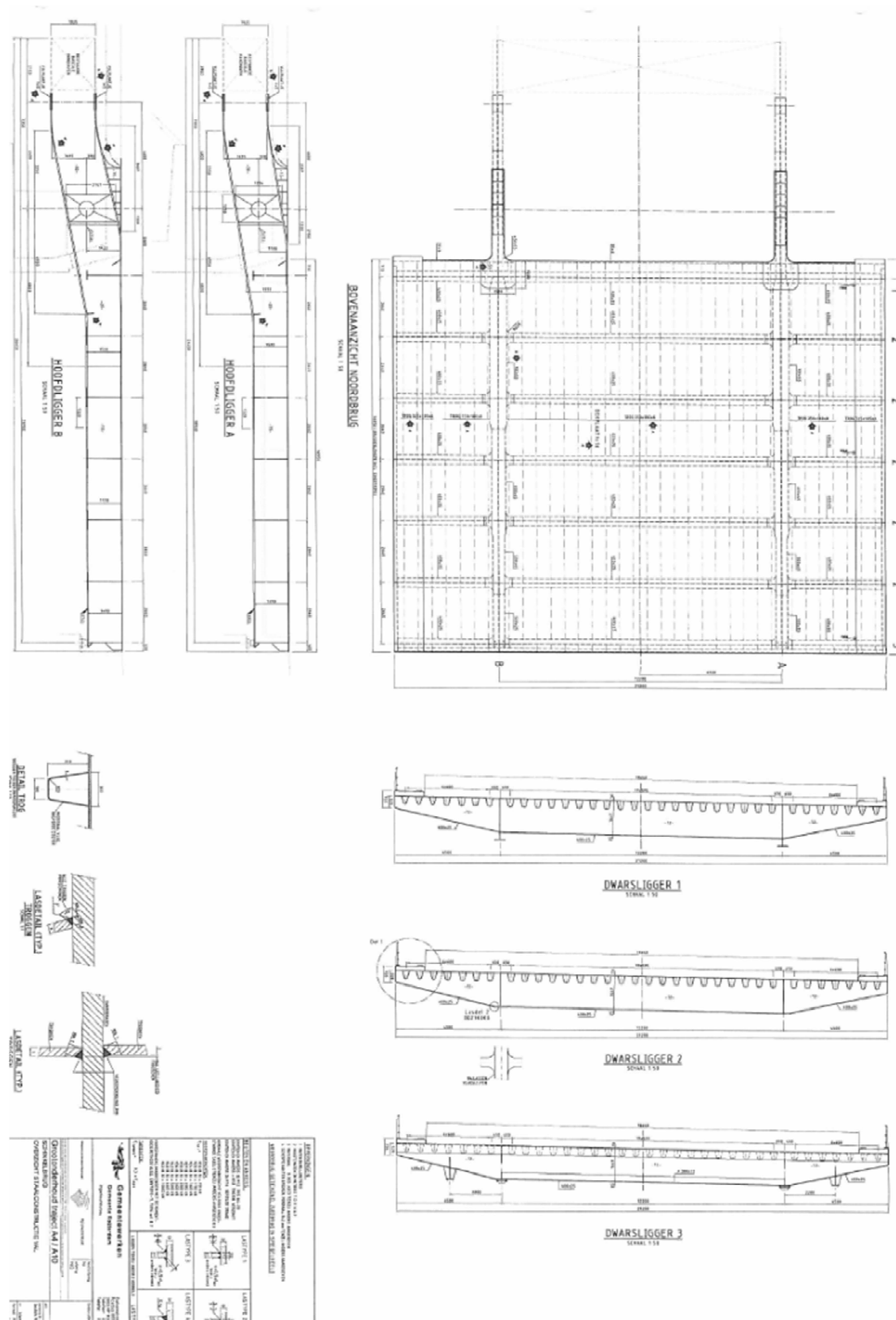
Figuur 2: Foto van de noordelijke Schinkelbrug. Aan weerszijden van de tunnel zijn absorptiecassettes aangebracht. De basculekelder met draaipunt is rechts.



Figuur 3: Foto van de noordelijke Schinkelbrug met links de hulpoplegging en daarnaast een van de twee hoofdoplegpunten onder de hoofdligger.



Figuur 4: Foto's van de oplegpunten van de val (oostzijde), links de hulpoplegging, rechts de hoofdoplegging onder de hoofdligger.



Figuur 5: Overzichtstekening van de noordelijke Schinkelbrug.

Tabel 1: Kentallen en gegevens van de val (uit referentie [2])

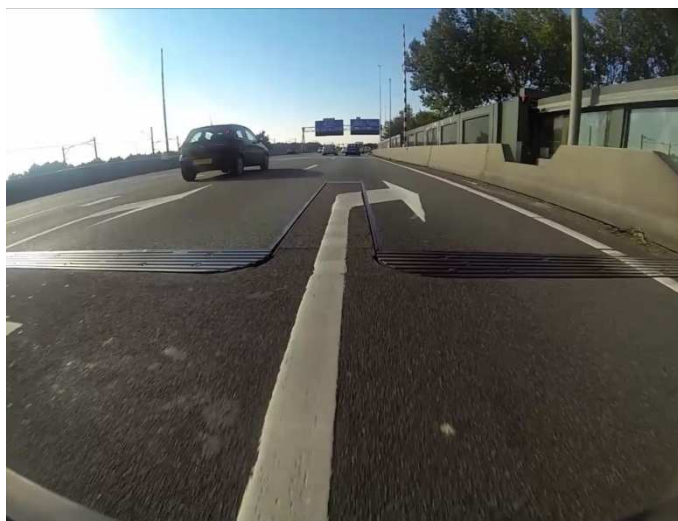
KENGETALLEN VAL			
Afmetingen (globaal)	overspanning (hoh oplegging)	18.70 m	
	lengte val	16.95 m	
	breedte val	21.20 m	
	hoh hoofddraaipunten	12.20 m	
Gewichten (globaal)	val nieuwe situatie	1630 kN	(netto staalgewicht)
	val nieuwe situatie	1735 kN	(incl. slijtlaag ,diversen en onvoorzien)
	ballast (excl ballastkist)	2075 kN	
	totaal gewicht	3810 kN	
Verplaatsingen	doorbuiging val (hoofdligger)	12 mm	(rep. waarde t.g.v. mobiel laststelsels LM 1).
	doorbuiging einde console	17 mm	(rep. waarde t.g.v. mobiel laststelsels LM 1).
	verplaatsing lengterichting	8 mm	(rep. waarde temperatuur)
OVERZICHT VAL			
De staalconstructie van het nieuwe val omvat:			
• 2 hoofdliggers h.o.h. 12.200 mm; • 2 consoles van 4.500 mm; • 7 dwarsdragers h.o.h. 2.640 mm; • 20 troggen (langsverstijvingen) tussen de hoofdliggers op een onderlinge afstand van 600 mm; • in totaal 14 troggen onder de consoles (7 per console) op een onderlinge afstand van 600 mm; • een dekplaat t =18 mm.			
Het nieuwe val is een orthotrope constructie. De dekplaat fungeert als bovenflens van de troggen, dwarsdragers en hoofdliggers. De totale breedte van het val bedraagt 21.200 mm. De afstand tussen de vooroplegging en het draaipunt bedraagt 18.700 mm. De dekplaat ligt bij beide vallen onder een helling van 1:50. De constructiehoogte van de hoofdliggers in het midden van de overspanning is gelijk; de hoogte van onderzijde onderflens tot bovenzijde slijtlaag bedraagt 1.498 mm. Bij de noordelijke brug ligt de meest noordelijke hoofdligger het laagst; bij de zuidelijke brug ligt de meest zuidelijke hoofdligger het laagst. De draaipunten van het val liggen op gelijke hoogte (+6,750 mNAP).			

2.3 Gegevens wegdek en voegen

Het wegdek op de brug bestaat uit een dunne epoxy slijtlaag. Foto's van de voegen zijn gemaakt met een rijdende camera, weergegeven in figuren 6 en 7.



Figuur 6: Foto van de voeg (oostzijde).



Figuur 7: Foto van de wegdekvoeg (westzijde, kant basculekelder).

3 Diagnostische metingen

3.1 Opzet van de metingen

De metingen zijn uitgevoerd op 27 en 28 oktober 2015. Doel van de metingen was de huidige situatie te karakteriseren voor wat betreft de hinderbepalende geluidemissie en onderbouwing voor geluidreducerende maatregelen aan de bestaande en de nieuwe brug.

Ter bepaling van de potentiële hinder is geluid continu gemeten gedurende 24 uur bij één woning (M1), naast de brug (M14) en gedurende één uur bij 2 andere woningen (M2 en M3). Daarbij is tegelijkertijd geluid en rijsnelheid van de twee buitenste rijstroken naast de snelweg gemeten en is video opgenomen vanuit de brugwachterstoren. Hiermee was het mogelijk individuele voertuigpassages te identificeren en te koppelen aan geluidniveaus bij de woningen.

Op de eerste dag is ook gemeten volgens de brugtoeslag methode [1] gedurende één uur, op 7,5 m uit het midden van de buitenste rijstrook (5), naast de brug op de punten op +/- 3 m ten opzichte van het wegdek M4/M6 en bij het referentiepunt M10 op +3 m ten opzichte van het wegdek. Daarnaast is ook vlak naast het geluidscherm op 1,5 m boven de schermrand gemeten zowel naast de brug vóór het brugwachtershuis (M14) als in de buurt van de referentiedoorsnede bovenaan de vluchtrap (M13), om zo de verre rijbanen ook te kunnen beoordelen en de bijdrage van andere bronnen niet afkomstig van het wegverkeer te minimaliseren.

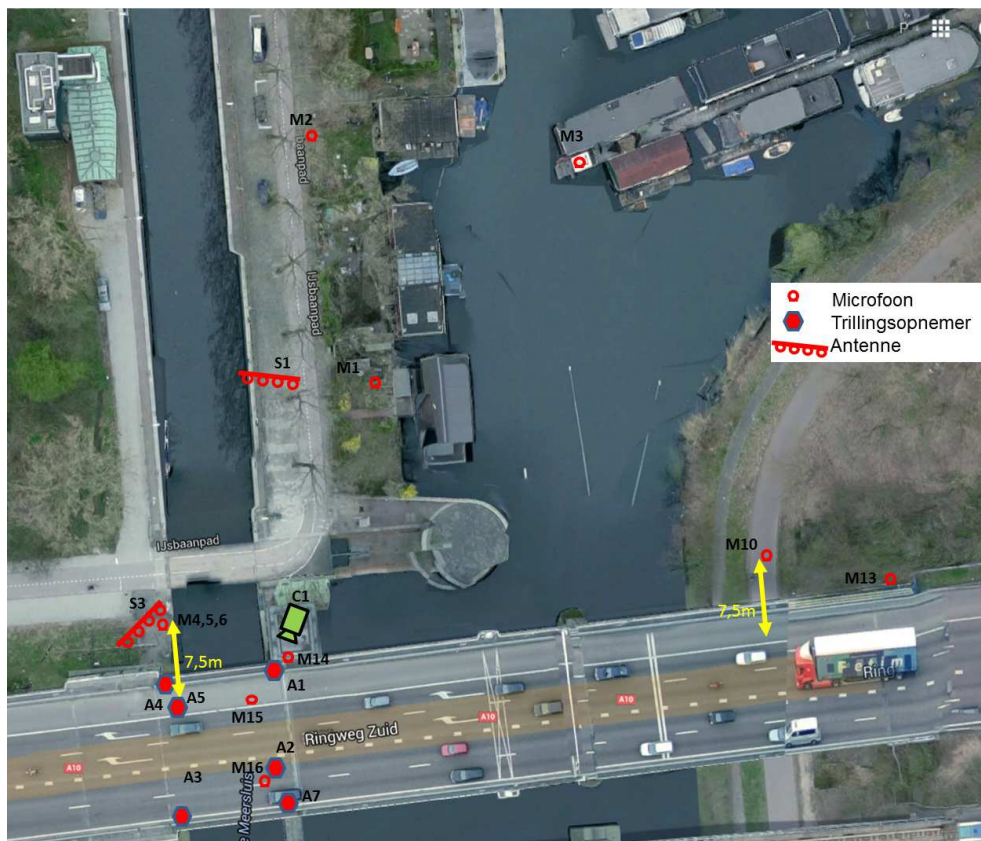
Antennemetingen zijn ook op de eerste meetdag uitgevoerd op enkele posities dichtbij en op enige afstand van de brug, om bronnen te lokaliseren.

Op de tweede meetdag zijn geluid en trillingen aan de brug gemeten, zowel voor de verkeersstroom als voor hameraanstoting onder de brug, om de brugresponsie en de demping te bepalen.

De posities en benaming van de meetpunten zijn weergegeven in figuur 8.

De weersomstandigheden waren op beide meetdagen gunstig met een gemiddelde temperatuur van rond de 11 graden, zonder neerslag, en met een maximale uurgemiddelde windsnelheid van 4,0 m/s uit richting OZO.

Een tabel met gebruikte meetapparatuur staat in bijlage A.

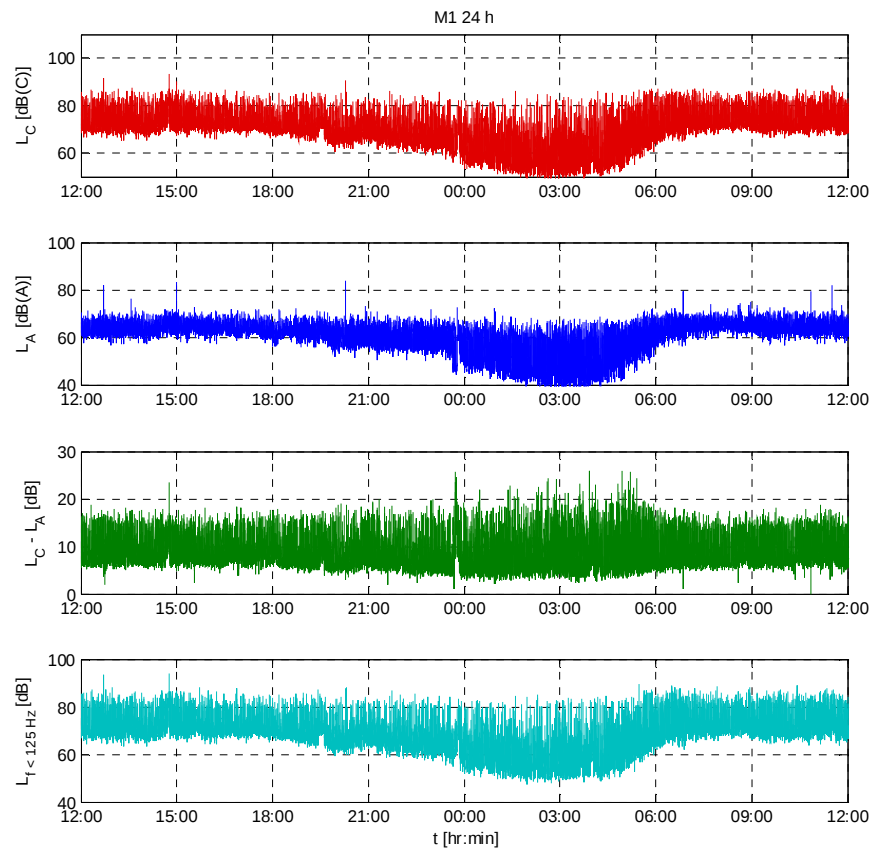


Figuur 8: Overzicht van meetposities voor geluid bij woningen, geluid bij de brug en de referentiedoorsnede (rechts), trillingen op de brug en antennemetingen. Een videocamera (C1) en radarsnelheidsmeter stonden op het brugwachtershuis. Op deze foto is de onderste rijstrook=1, de (nu bereden) vluchtstrook=5.

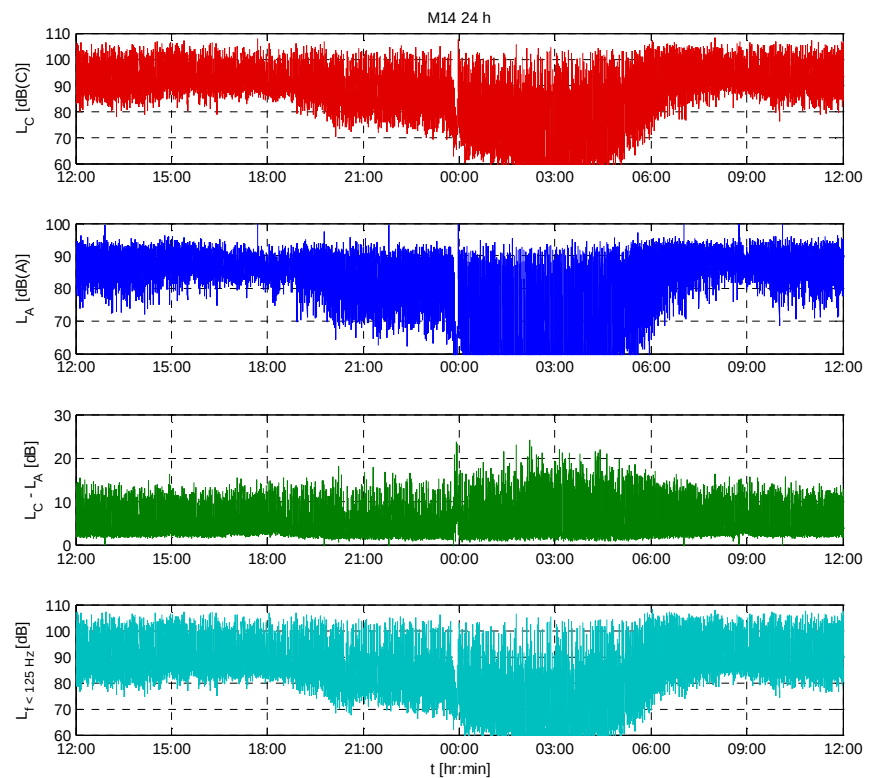
3.2 Metingen bij ontvangpunten en naast de brug

De C-gewogen en A-gewogen geluiddrukkniveaus bij meetpunt M1 en M14 zijn weergegeven in figuur 9 en 10, samen met het verschil daartussen en de bijdrage onder 125 Hz ter indicatie van het laagfrequente geluid.

Hierin is te zien dat er vele duidelijke laagfrequente pieken aanwezig zijn gedurende het gehele etmaal, zij het 's nachts in mindere mate. Enkele hoge pieken in het A- en C-gewogen niveau zijn ook van andere bronnen afkomstig zoals de waarschuwingsbel van de fietsbrug en luide voertuigen waaronder motoren. De dip in de niveaus rond 23:30 is veroorzaakt door de opening van de brug. De brug is ook om 02:30 opengegaan, echter dit is nauwelijks zichtbaar in de meting. Belangrijk is dat het beweegbare geluidscherm daarna een storing had en open is gebleven tot 11:30 op 28 oktober. Dit heeft echter geen groot effect op de niveaus, wat te verklaren is met de hoge bijdrage van de onderkant van de brug.

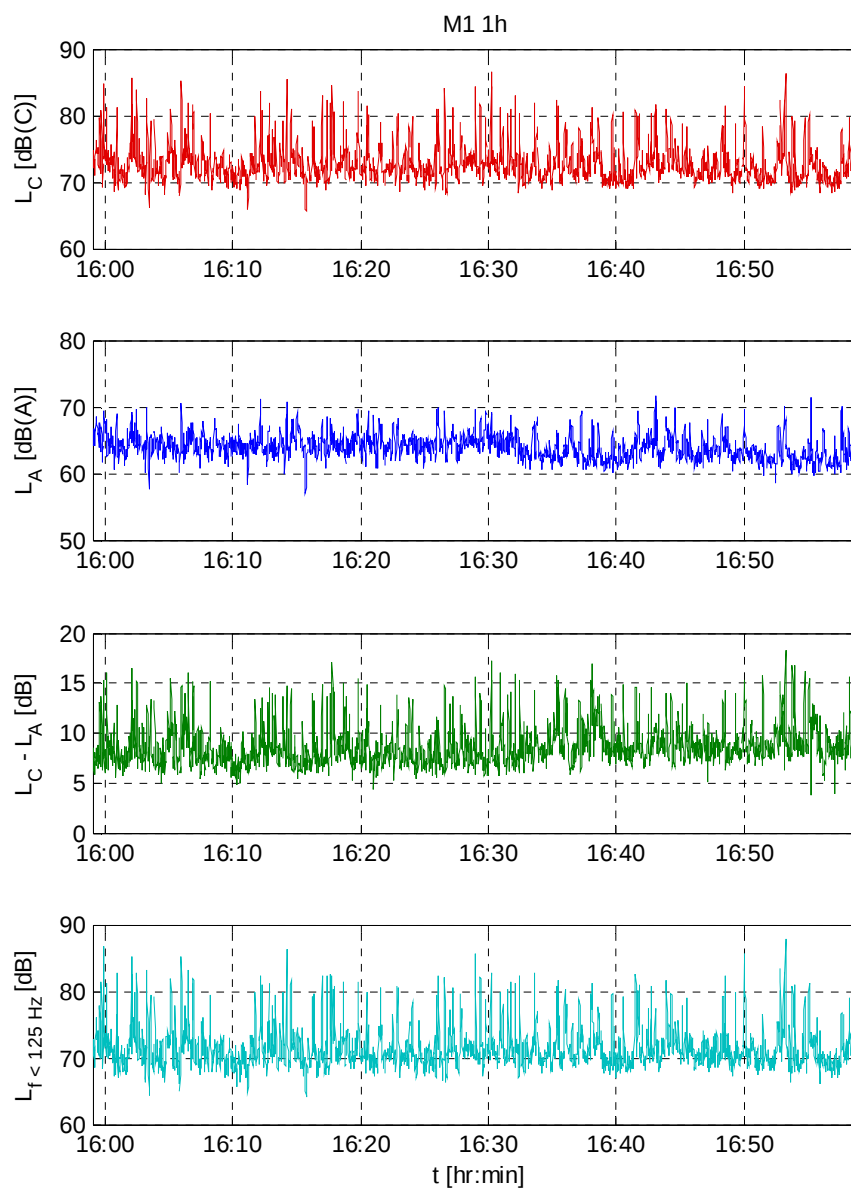


Figuur 9: C-gewogen, A-gewogen geluidrukniveauverloop, verschil $L_C - L_A$ en ongewogen geluidrukniveau voor 25-125 Hz gedurende 24 uur op meetpunt M1.

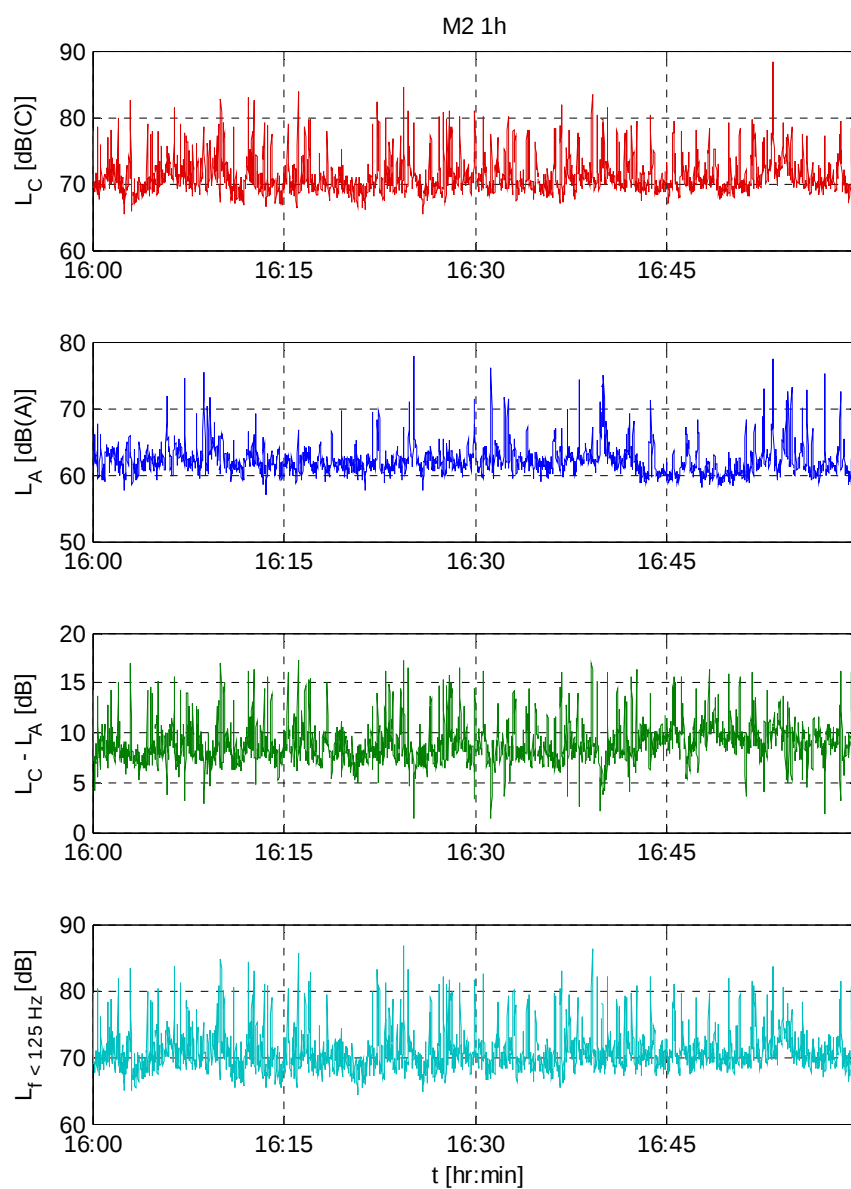


Figuur 10: C-gewogen, A-gewogen geluidrukniveauverloop, verschil $L_C - L_A$ en ongewogen geluidrukniveau voor 25-125 Hz gedurende 24 uur op meetpunt M14.

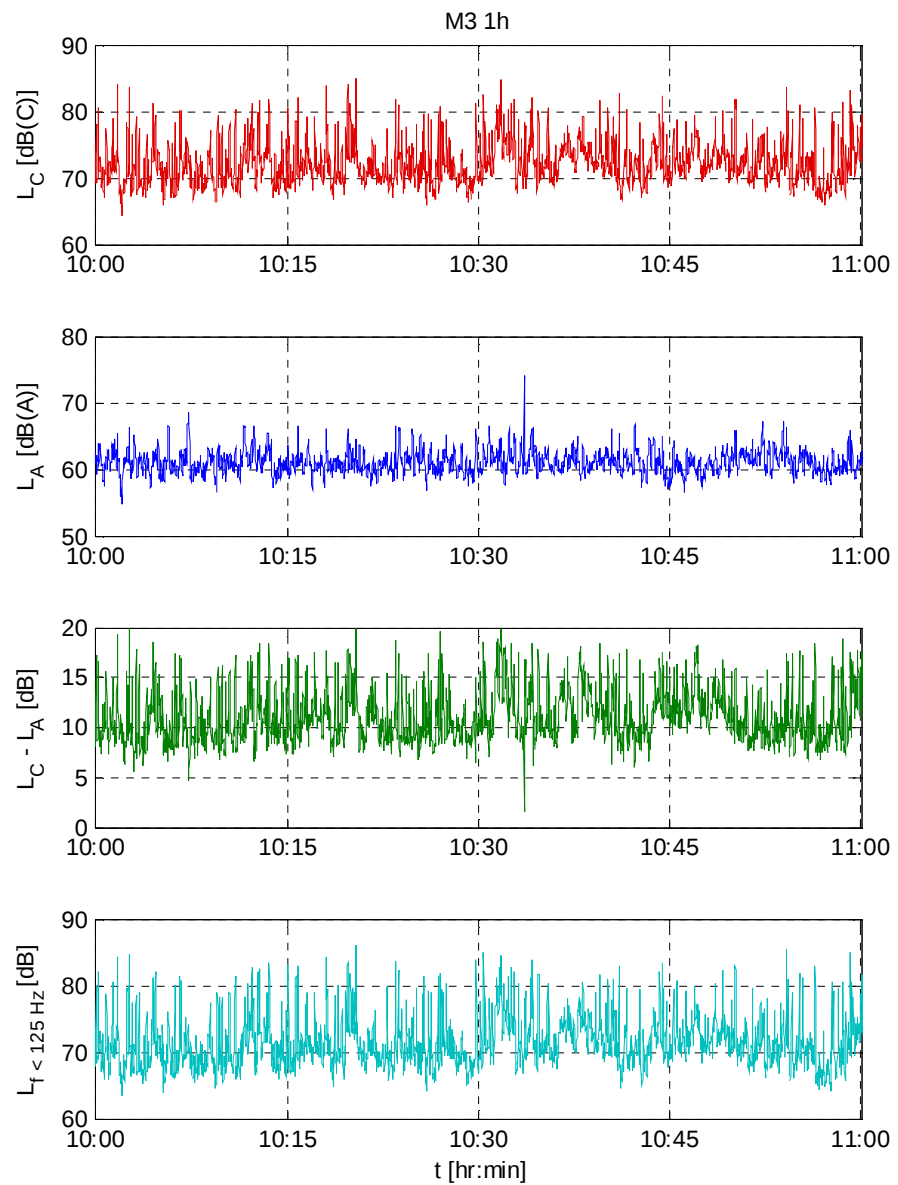
Dezelfde gegevens worden in figuur 11-14, voor posities M1/M2/M3/M14 getoond gedurende 1 uur. De meettijd voor M2 was 16:00-17:00 op 27 oktober en voor M3 10:00-11:00 de volgende dag.



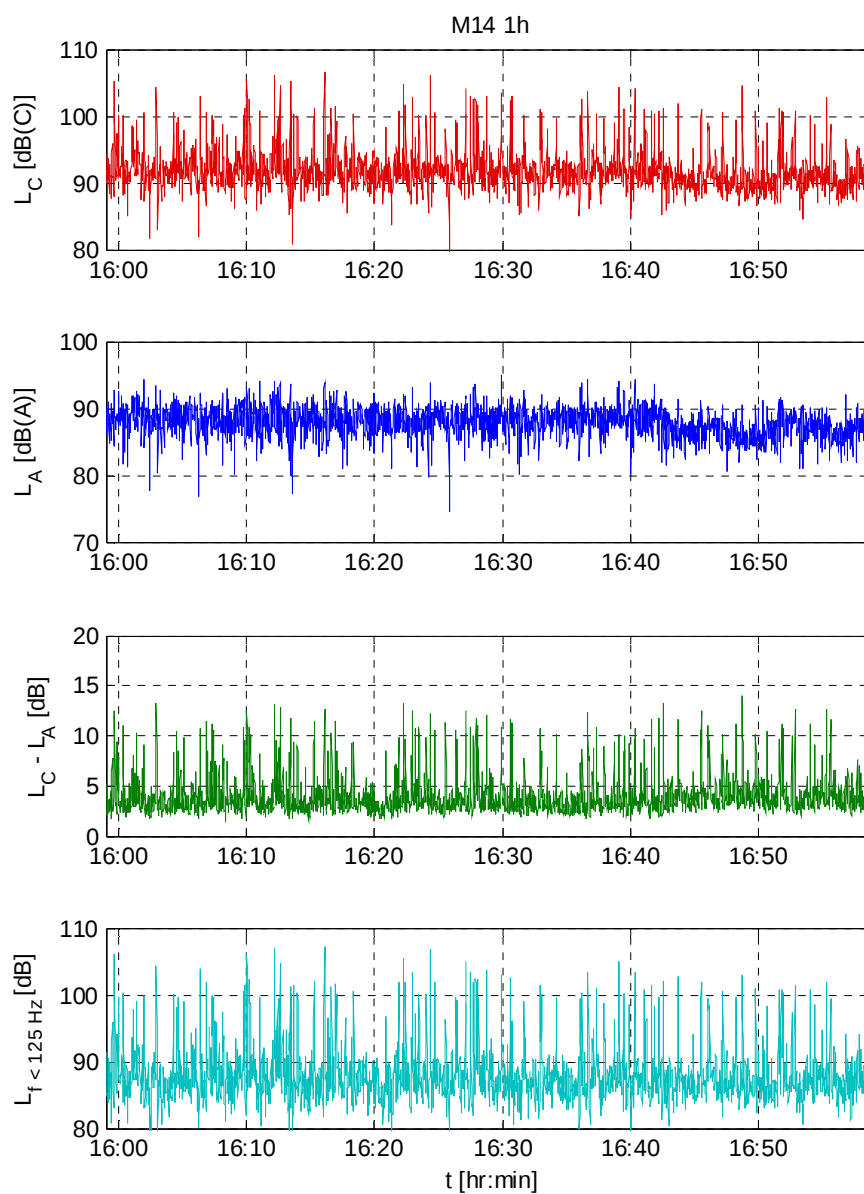
Figuur 11: Ongewogen, A-gewogen geluidsdruk-niveauverloop, verschil $L_C - L_A$ en niveauverloop voor frequenties onder 125 Hz gedurende 1 uur op meetpunt M1.



Figuur 12: Ongewogen, A-gewogen geluidrukniveauverloop, verschil $L_C - L_A$ en niveauverloop voor frequenties onder 125 Hz gedurende 1 uur op meetpunt M2.



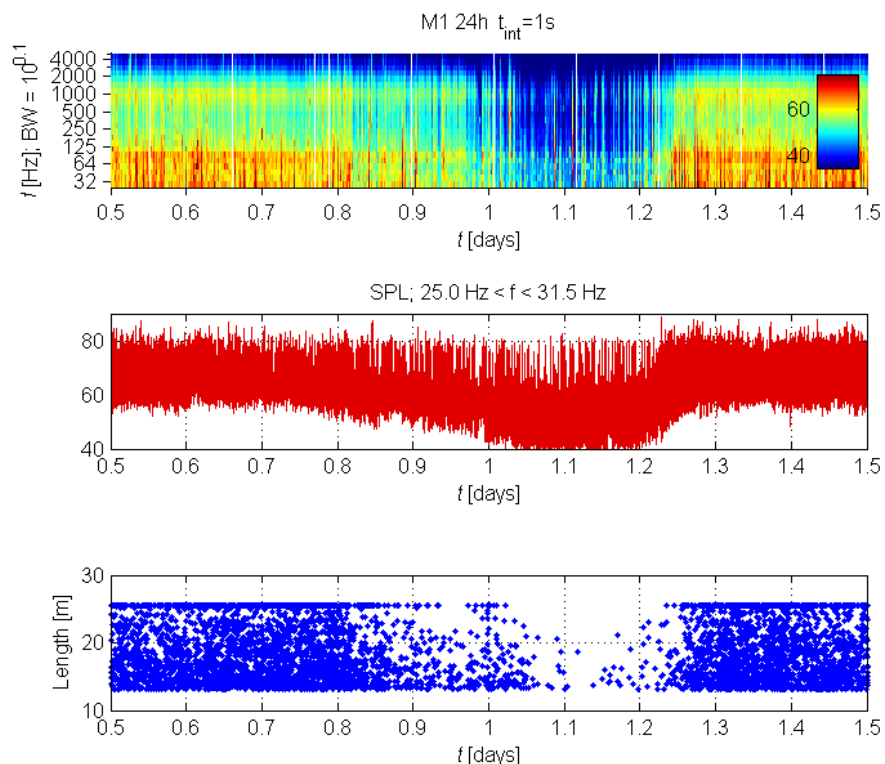
Figuur 13: Ongewogen, A-gewogen geluiddrukkniveauverloop, verschil $L_C - L_A$ en niveauverloop voor frequenties onder 125 Hz gedurende 1 uur op meetpunt M3.



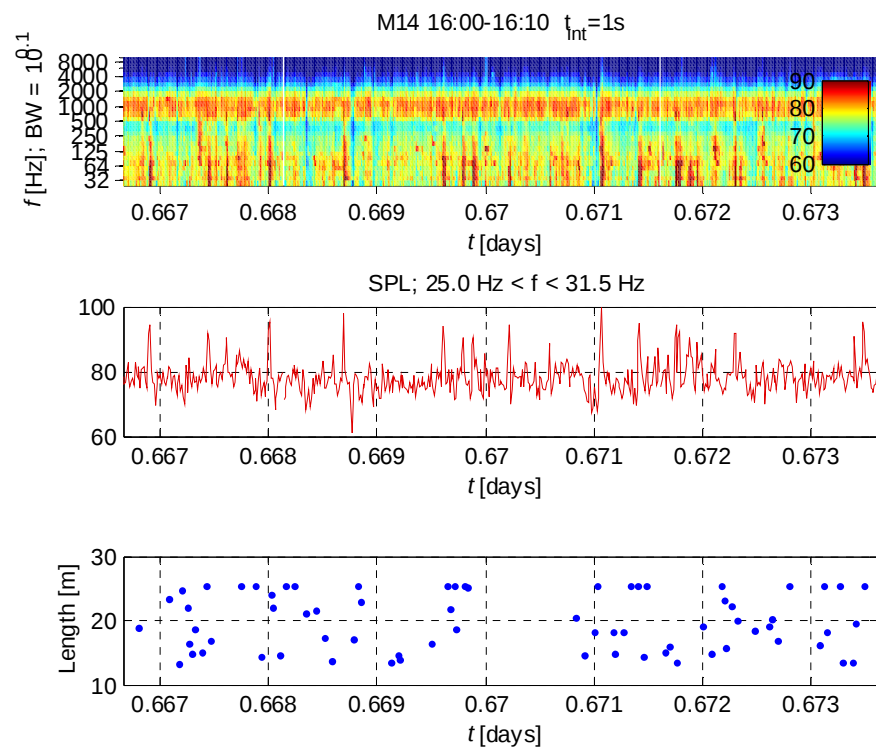
Figuur 14: Ongewogen, A-gewogen geluidrukniveauverloop, verschil $L_C - L_A$ en niveauverloop voor frequenties onder 125 Hz gedurende 1 uur op meetpunt M14.

Het aantal keren dat in de lage frequentiebanden (63 Hz en daaronder) een hoog niveau optreedt is in de beschouwde 1 uur periodes van 10-11:00 en 16-17:00 rond 50-100 keer per uur, afhankelijk van de drempelkeuze.

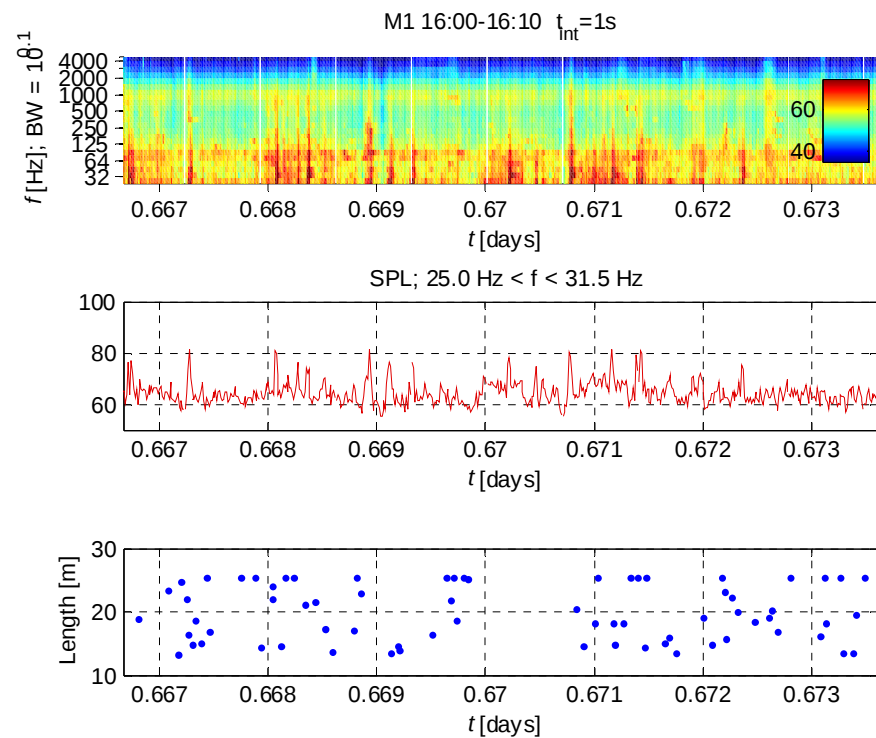
In figuur 15 worden het spectrogram, het niveauverloop en voertuiglengtes getoond (groter dan 12m, 4^e/5^e rijstrook rechts) van M1 voor een periode van 24 uur. Daarin is het sterk verminderde aantal vrachtauto's in de nachtperiode goed herkenbaar. Dezelfde gegevens staan in figuren 16-19 voor posities M14, M1, M2 en M3 voor een periode van 10 minuten. Daarin zijn de laagfrequente pieken van de voertuigpassages duidelijk te zien, ook op de verder gelegen meetpunten M2 en M3.



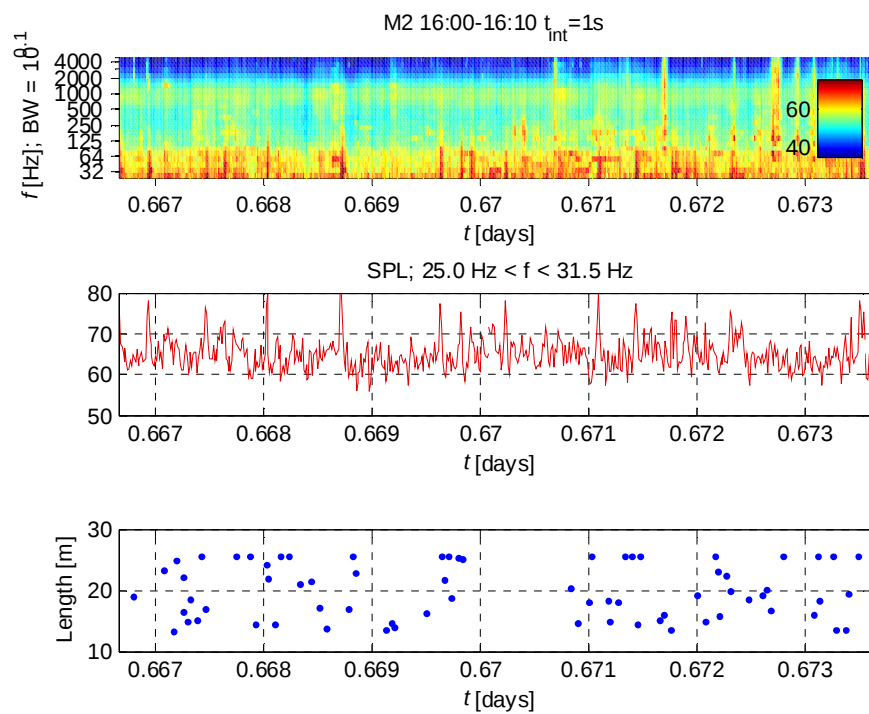
Figuur 15: Eén derde octaaf spectrogram van de geluiddruk, laagfrequent ongewogen niveauverloop in de 25 en 31,5 Hz één derde octaafbanden en voertuiglengtes (>12m) op de rechter rijstrook voor meetpunt M1 gedurende 24 uur (12:00-12:00, de schaalwaarde 1 komt overeen met de tijd 00:00).



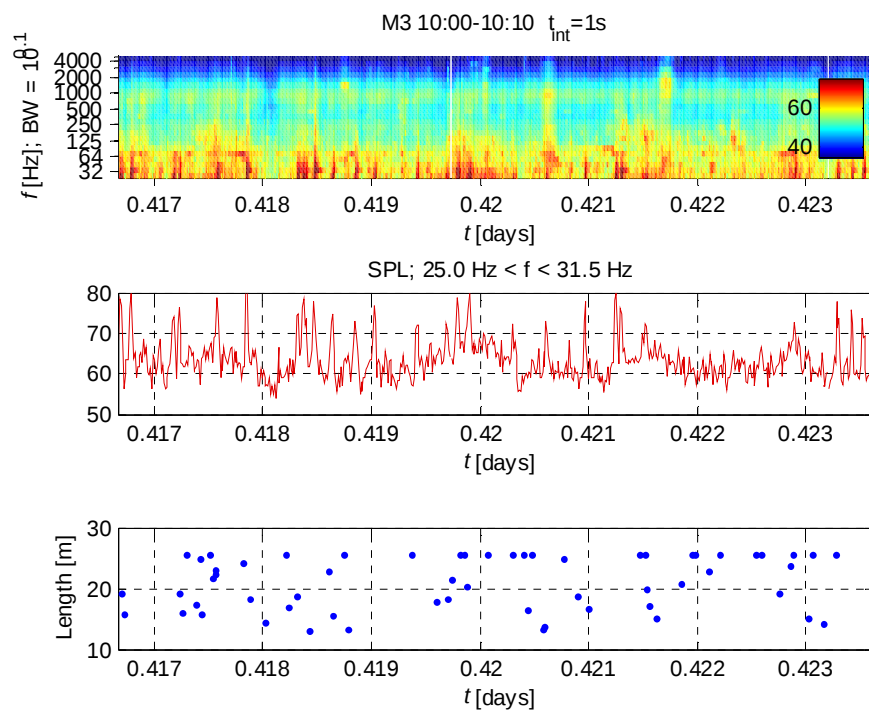
Figuur 16: Eén derde octaaf spectrogram van de geluidsdruk, laagfrequent ongewogen niveauverloop in de 25 en 31,5 Hz één derde octaafbanden en voertuiglengtes (>12m) op de rechter rijstrook voor meetpunt M14 (brug) van 16:00-16:10 op 27 oktober.



Figuur 17: Eén derde octaaf spectrogram van de geluidsdruk, laagfrequent ongewogen niveauverloop in de 25 en 31,5 Hz één derde octaafbanden en voertuiglengtes (>12m) op de rechter rijstrook voor meetpunt M1 van 16:00-16:10 op 27 oktober.



Figuur 18: Eén derde octaaf spectrogram van de geluidsdruk, laagfrequent ongewogen niveauverloop in de 25 en 31,5 Hz één derde octaafbanden en voertuiglengtes (>12m) op de rechter rijstrook voor meetpunt M2 van 16:00-16:10 op 27 oktober.



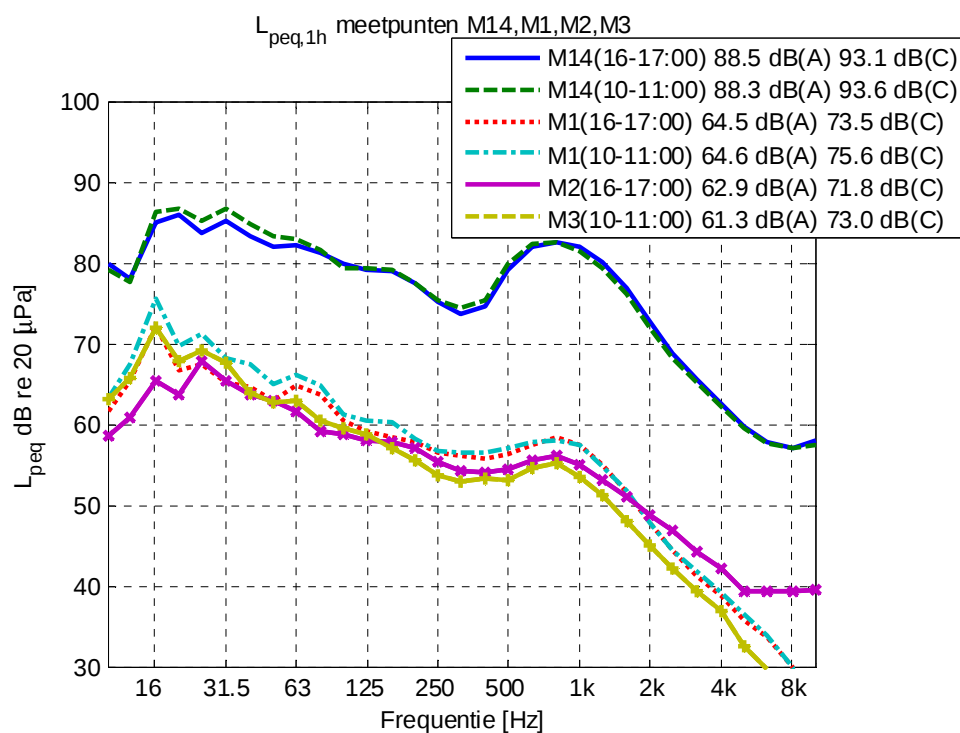
Figuur 19: Eén derde octaaf spectrogram van de geluidsdruk, laagfrequent ongewogen niveauverloop in de 25 en 31,5 Hz één derde octaafbanden en voertuiglengtes (>12m) op de rechter rijstrook voor meetpunt M3 van 10:00-10:10 op 28 oktober.

De totale equivalente geluidrukniveaus voor de dag- avond- en nachtperiodes zijn in tabel 2 weergegeven voor meetpunten M1 en M14 samen met de equivalente C-gewogen niveaus en L_{C-L_A} niveaus. Tevens zijn de A- en C-gewogen equivalente niveaus gedurende één uur en overeenkomstige L_{C-L_A} niveaus vermeld.

Tabel 2: Equivalente A-en C-gewogen geluidrukniveaus en L_{C-L} niveaus voor de dag- avond- en nachtperiode op meetpunten M1 en M14, en voor M2 en M3 in de dagperiode op basis van 1 uur.

	L_{day}	L_{eve}	L_{night}	L_{DEN}	L_{dayC}	L_{eveC}	L_{nightC}	L_{C-L_A} (day)	L_{C-L_A} (eve)	L_{C-L_A} (night)
M1	65,0	62,7	59,8	67,6	73,8	70,6	68,4	8,8	7,9	8,6
M14(weg)	88,4	86,2	83,0	90,9	-	-	-	-	-	-
M2	62,9	-	-	-	71,8	-	-	8,9	-	-
M3	61,3	-	-	-	73,0	-	-	11,7	-	-

Het één derde octaafspectrum van het equivalente geluidrukniveau wordt in figuur 20 weergegeven gemiddeld over 1 uur voor meetpunten M14, M1, M2 en M3. Deze spectra zijn in tabelvorm opgenomen in bijlage B.



Figuur 20: Eén derde octaafspectrum van het equivalente geluidrukniveau gedurende 1 uur op meetpunten M1, M2, M3 en M14 (boven brug).

De gemiddelde geluiddrukspectra bij de ontvangposities M1, M2 en M3 verschillen steeds met 2 dB in het dB(A)-niveau met 65, 63 en 61 dB(A) respectievelijk. De afstanden tot de voorzijde midden van de brug is voor M1 40 m, voor M2 90 m en voor M3 86 m. De loodrechte afstand tot de rijbaan is voor M1 35 m, voor M2 72 m en voor M3 65 m. De verschillen in de niveaus zijn mede afhankelijk van de afstand tot de brug, de loodrechte afstand tot de weg en de openingshoek van de brug en de rest van de weg.

Het spectrale niveau van positie M1 is vanaf 63 Hz tot boven 1 kHz 2-3 dB hoger dan M2. Onder 63 Hz zijn de verschillen in het laagfrequente geluid veel kleiner. De twee metingen van M1 zijn met het geluidscherm dicht (16:00-17:00) en open (10:00-11:00), waaruit te zien is dat het scherm op de brug een zeer beperkt effect op de geluidimmissie van de brug als geheel heeft.

Laagfrequent geluid onder 125 Hz is vooral afkomstig van de brug en is voldoende hoog om hinder te veroorzaken op alle drie ontvangpunten bij de woningen, met kortstondige L_C-L_A niveaus van rond de 15 dB overdag oplopend tot 20 dB 's nachts en overdag bij punt M3. Met name de laagfrequente pieken zijn een sterke bron van hinder. De gemiddelde L_C-L_A niveaus liggen bij 9 dB bij meetpunten M1 en M2 en 12 dB bij M3. De A-gewogen niveaus bij de woningen liggen overdag rond 65, 63 en 61 dB(A) voor M1, M2 en M3 respectievelijk; de C-gewogen niveaus zijn 74, 72, 73 dB(C).

Op grond van de in [1] voorgestelde criteria voor laagfrequente hinder zoals opgenomen in tabel 3 zou sprake zijn van lichte tot duidelijke hinder op basis van de laagfrequente pieken. Indien de L_C-L_A niveaus op basis van de equivalente niveau wordt bepaald dan zou er sprake van geen laagfrequente hinder voor M1 en M2 tot lichte hinder voor M3. De reden dat de hindermaat L_C-L_A lager is voor meetpunten M1 en M2 is dat de bijdrage van het middenfrequente geluid afgestraald door de brug aldaar hoger is dan bij M3.

Tabel 3: Beoordeling van laagfrequente hinder bij bruggen

L_C-L_A dB	Hinder
≤ 10	Geen hinder
11-15	Lichte hinder
16-20	Duidelijke hinder
> 20	Ernstige hinder

De individuele laagfrequente pieken in figuren 16-19 bevatten voor sommige passages met hoge niveaus ook middenfrequente bijdrages, hetgeen wijst op stootexcitatie in de constructie. Dit is vooral relevant voor de positie M1 dicht bij de brug.

Het geluid van de voegen en het rolgeluid op de brug is steeds minder sterk met toenemende afstand en afnemende openingshoek van de brug. Middenfrequent geluid afkomstig van de voegen en rolgeluid is op alle 3 punten aanwezig, alleen in mindere mate bij M2 en M3 wegens de grotere afstand en kleinere openingshoek van de brug. Het geluidscherm op de brug heeft een zeer beperkt effect op de geluidemissie van de brug als geheel wegens de sterkere bijdrage van de onderkant voor het middenfrequent gebied 250 Hz – 2 kHz.

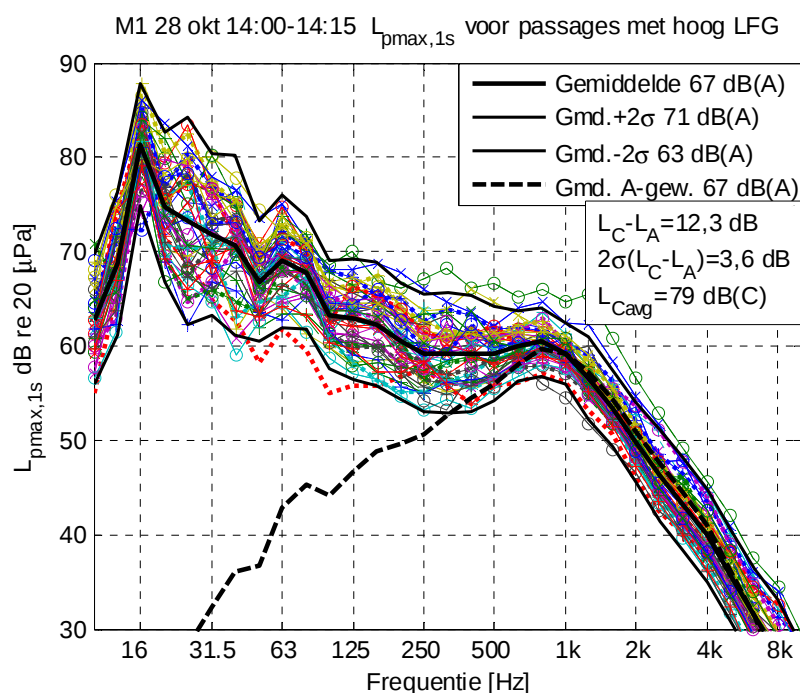
De pieken ten gevolge van de brugvoegen zijn een extra bron van hinder mede omdat ze ook door de brugconstructie en de ruimte onder de brug worden versterkt.

3.3 Maximumspectra van passages met sterk laagfrequent geluid

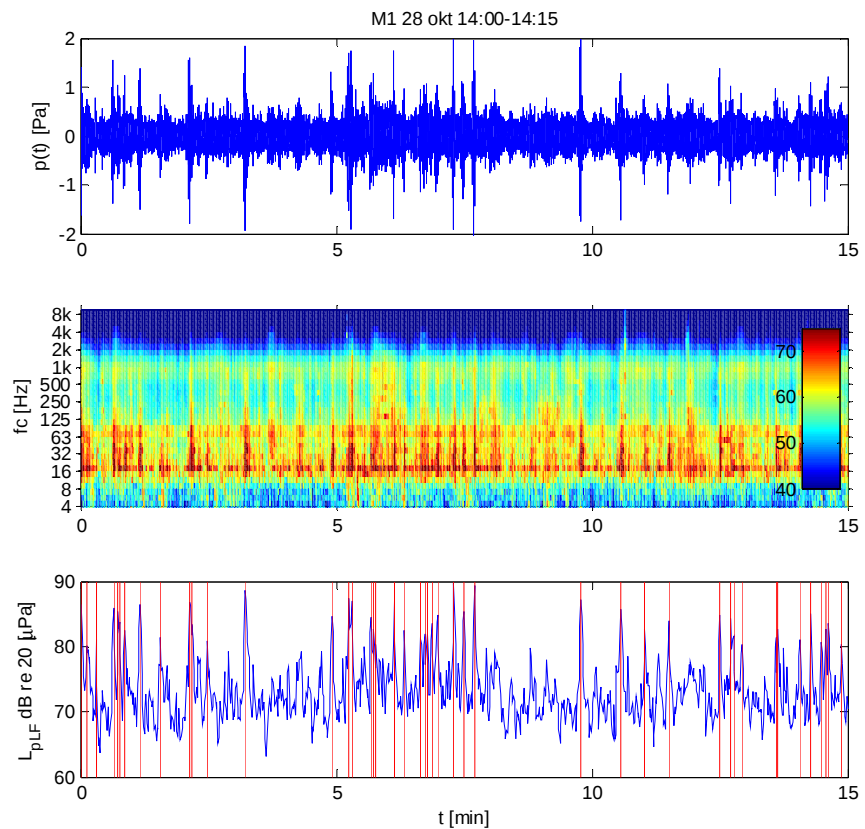
Het gemiddelde van de maximum ongewogen geluidrukspectra van 45 passages van zware voertuigen staat in figuur 21, met het gemiddelde en het 95% zekerheidsinterval ($\pm 2 \times$ standaarddeviatie). De tijdstippen zijn bepaald uit het laagfrequent niveauverloop en het spectrogram in figuur 22.

Dit geeft een beeld van de spectra van de individuele passageniveaus die laagfrequent geluid veroorzaken. De spectrale spreiding onder 400 Hz loopt op tot ca. 12-18 dB. Het gemiddelde dB(A)-niveau van de passagepieken ligt op 71 dB(A), 6 dB hoger dan het equivalente niveau van de hele verkeersstroom. Het C-gewogen niveau ligt gemiddeld op 79 dB en het $L_C - L_A$ - niveau op 12,3 dB met een spreiding van rond de 7 dB.

Ter vergelijking staat ook het A-gewogen spectrum van het gemiddelde in dezelfde grafiek. Daaruit blijkt dat het A-gewogen niveau wordt gedomineerd door het frequentiegebied tussen 250 Hz en 2 kHz, terwijl de spectrale energie bij lage frequenties onder 250 Hz aanzienlijk is.



Figuur 21: Eén derde octaafspectra van het $L_{A\max}$ geluidruksniveau voor 45 voertuigpassages met sterk laagfrequent geluid op meetpunt M1, met gemiddeld spectrum, 2x standaarddeviatie en ter vergelijking het A-gewogen gemiddeld spectrum van deze passages.



Figuur 22: Tijdsignaal van de geluiddruk op meetpunt M1, spectrogram in één derde octaafbanden en laagfrequent niveauverloop met 45 voertuigpassages met hoge laagfrequente geluidniveaus zijn aangegeven. $L_{p,LF}$ is het energetisch gesommeerde geluiddrukkniveau in de banden 20-100 één derde octaafbanden.

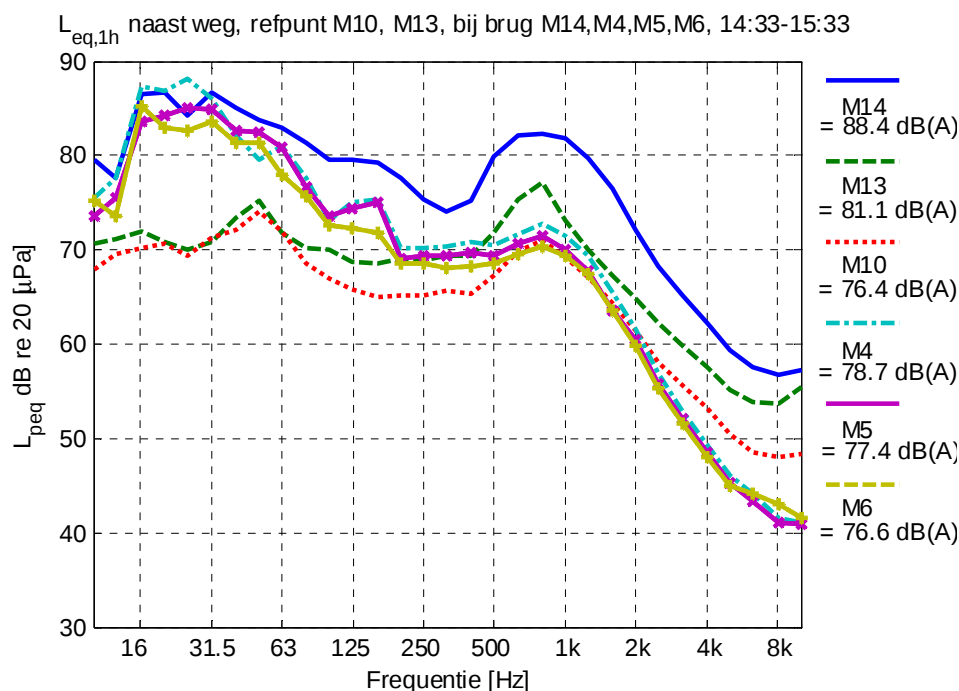
Individuele voertuigpassages zijn uit de video opnames te identificeren. Voorbeelden met foto's van 24 van de 45 passages uit figuur 22 die sterk laagfrequent geluid produceren staan in figuur 23.



Figuur 23: Opeenvolgende foto's van voertuigpassages met sterk laagfrequent geluid, 14:00-14:15 uur. Tijden van de foto-opnames zijn van links naar rechts:
 14:00:24, 14:00:45, 14:01:50,
 14:02:59, 14:04:47, 14:05:01,
 14:05:02, 14:05:05, 14:05:09,
 14:05:10, 14:05:12, 14:05:36,
 14:06:04, 14:06:39, 14:06:40,
 14:06:46, 14:06:48, 14:07:11,
 14:09:37, 14:11:22, 14:12:25,
 14:13:56, 14:14:06, 14:14:22.

3.4 Vergelijking van spectra bij de brug en bij het referentiepunt

Een onderlinge vergelijking van de geluidspectra bij het referentiemeetpunt M10 en M13 en bij de meetpunten naast de brug M14, M4, M5 en M6 staat in figuur 24 en in tabelvorm in bijlage B..



Figuur 24: Spectra in één derde octaafbanden van het equivalente geluiddruk niveau gedurende 1 uur bij het referentiemeetpunt M10, M13 en bij de meetpunten naast de brug M14, M4, M5 en M6. M4 is 3 m onder het wegdek, M6 3 m erboven.

Hieruit is het volgende te concluderen:

Voor het referentiemeetpunt M10 dat 70 m van de brug verwijderd is, is vooral sprake van geluid van het wegverkeer zonder veel bijdrage van het bruggeluid. Belangrijk hierbij is dat bij meetpunt M10 zich ook een voeg bevindt, waardoor dit niet een ideale referentie doorsnede is. Betere posities waren niet beschikbaar in deze situatie;

De vergelijking tussen meetpunt M10 op 7,5 m uit de middenlijn van de buitenste rijstrook op 3m boven het wegdek, en punt M13 op 1,5m boven het geluidscherm en 5 m uit de middenlijn toont een indicatieve schermwerking van gemiddeld 5 dB vanaf 100 Hz. Hieruit is op te maken dat het scherm naar verwachting minstens deze reductie heeft op lager gelegen ontvangpunten. Bij de brug staat een vergelijkbaar scherm naast de rijbaan, waarvoor een soortgelijke reductie te verwachten is;

Bij punten M10 en M13 valt de piek op bij 50 Hz, wat waarschijnlijk afkomstig is van het motorgeluid van zware en middelzware voertuigen (ontstekingsfrequentie). De piek rond 800 Hz is ten gevolge van geluid van voegen en banden;

De vergelijking tussen meetpunt M14 bij het brugwachtershuis en M13 bij het referentiepunt (beide 1,5 m boven het geluidscherm) toont een hoger niveau bij de brug (M14). Het verschil is ca. 15 dB bij lage frequenties rond 25 Hz, bij hoge frequenties rond 1 kHz neemt het verschil af naar ca. 7 dB;

Een deel van deze verhoging is ten gevolge van de positie van M14 naast de reflecterende wand van het brugwachtershuis, naar schatting 3 dB. De overige 4 dB is afkomstig van voegen en het verschil in wegdek loopvlak.

3.5 Conclusies

De hinder bij de woningen vlak naast de brug bij M1 wordt bepaald door zowel het laagfrequente geluid afgestraald door de stalen brug bij zware en middelzware voertuigpassages, als door het rol- en voeggeluid van de brug. Woningen op iets grotere afstand zoals bij M2 en M3 hebben vergelijkbare laagfrequent geluid en iets lagere dB(A)- niveaus ten gevolge van het geluid van de brugvoegen en brugwegdek. De bijdrage van de brug aan het totale geluid van de A10 draagt steeds minder bij met toenemende afstand en smallere hoek met de weg.

De onderzijde van de brug straalt het meeste voeg- en rolgeluid af doordat het niet afgeschermd is, een grote afstralende constructie heeft en reflecties in de tunnel optreden. Dit bleek ook uit een verschilmeting met het scherm open en dicht wat op het totaal maar 1 dB verschil te zien gaf. Zonder scherm zou de bijdrage van de onderkant van de brug ook domineren voor woningen op korte afstand. Het voeg- en rolgeluid van de brug wordt vooral gedomineerd door auto's. Hun aantallen en rijnsnelheden veroorzaken veel meer geluidspieken en breedbandig geluid vooral tussen 250 en 2kHz.

Het laagfrequente, vaak impulsief geluid onder 125 Hz is afkomstig van de brug en wordt aan de onderkant door de tunnel versterkt waardoor de onderkant domineert. De niveaus zijn voldoende hoog om hinder te veroorzaken op alle drie ontvangpunten, met L_C - L_A niveaus van rond de 15 dB bij M1 en M2, tot 20 dB bij M3 en 's nachts bij M1.

Overdag kunnen rond 50-100 laagfrequente pieken per uur ten gevolge van vrachtwagenpassages optreden, en soms meer, die bij alle woningen goed hoorbaar zijn. In de nachtperiode 24:00- 06:00 is dat duidelijk veel minder maar niet afwezig. Desalniettemin kan de hinder in de nacht substantieel zijn doordat de verkeersstroom kleiner en het achtergrondniveau lager is en incidentele klappen meer opvallen. De momentane geluidsniveaus laten een veel grotere variatie zien. Dit komt tot uiting in hogere L_C - L_A niveaus bij de ontvangpunten.

Niet alle zware voertuigen veroorzaken laagfrequent geluid, en middelzware voertuigen waaronder ook sommige bestelauto's lijken ook soms laagfrequent geluid te veroorzaken, zij het in mindere mate.

De onderlinge bijdragen van rijstroken zijn nog niet bekend. Uit de data is echter te zien dat vrachtauto's en sommige middelzware voertuigen op alle rijstroken potentieel laagfrequent geluid kunnen produceren. Deze voertuigen rijden het meeste op de derde en de vijfde (buitenste) rijstrook. De bijdragen hangen sterk af

van de actuele verkeersstroom op iedere rijstrook, die gedurende de dag sterk kan variëren.

De individuele laagfrequente pieken bevatten bij hoge niveaus vaak ook middenfrequente bijdrages, hetgeen wijst op stootexcitatie in de constructie. Dit is het sterkste voor de positie M1 dicht bij de brug, maar ook relevant bij de andere meetpunten M2 en M3.

3.6 Metingen volgens de brugtoeslagmethode

De brugtoeslag is bepaald volgens de methode beschreven door Movares in [1]. Het equivalente geluidrukniveau werd simultaan naast de brug en bij een referentiepunt gemeten op een afstand van 7,5 m uit het midden van de rechter (vijfde) rijstrook (zie figuur 8):

- op meetpunt M4 bij de brug op 3 m onder het wegdek;
- op meetpunt M6 bij de brug op 3 m boven het wegdek;
- op referentiepunt M10 op 3 m boven het wegdek.

De geluidspectra voor deze meetpunten in één derde octaafbanden zijn weergegeven in de vorige paragraaf, figuur 24.

Meetpunten M4 en M6 waren niet vóór het midden-dwarsdoorsnede van de brug zoals omschreven in het meetvoorschrift, maar aan de kade naast de basculekelder. Dit was noodzakelijk door gebrek aan een veilige opstelpositie midden voor de brug wegens water en de bewegende fietsbrug, die bovendien op grotere afstand ligt dan gewenst.

De meetduur werd bepaald conform het meetvoorschrift, zodanig dat het geluidrukniveau in de 63 Hz octaafband binnen 1 dB stabiel was, effectief een meetperiode van 20 minuten, startend vanaf 14:33 op 27 oktober. Gedurende deze periode was de rijsnelheid en het verkeersaanbod normaal.

De equivalente geluiddruk spectra in octaafbanden staan in figuur 25. De correctiefactoren voor de invloed van de brug op het geluidniveau per octaafband C_{W1} en C_{W2} werden bepaald volgens het meetvoorschrift:

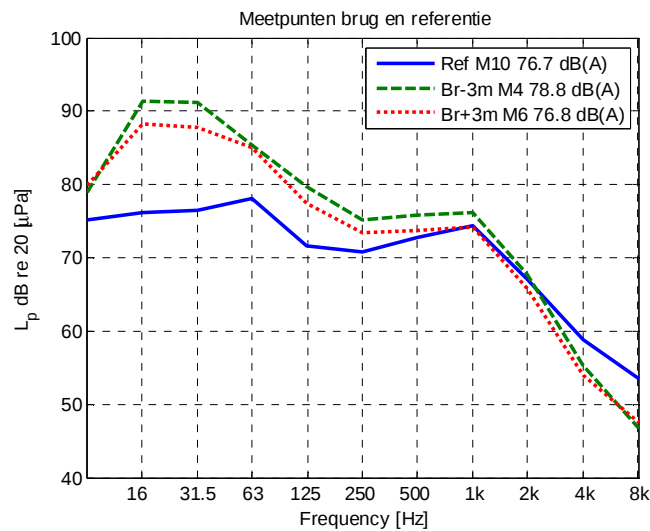
$$C_{W1} = L_{p,brugdek} - L_{p,weg}$$

$$C_{W2} = L_{p,onder brug} - L_{p,weg}$$

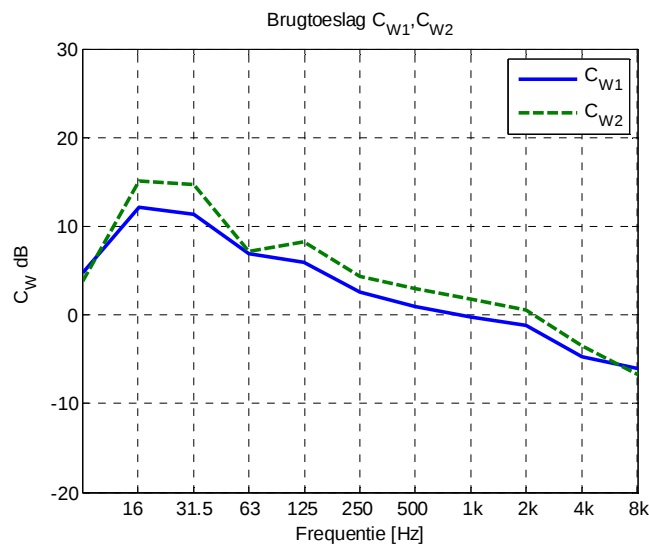
Deze factoren staan in figuur 26 als octaafbandspectra weergegeven en in tabelvorm in bijlage B.

Geluidspectra op extra microfoonposities zijn ter vergelijking in figuur 27 weergegeven (vergelijk met figuur 24 voor één derde octaafbandspectra):

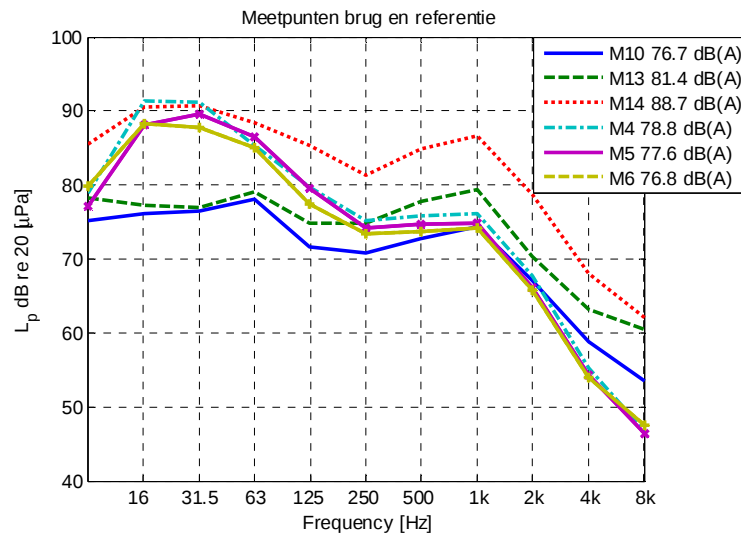
- M13 referentiedoorsnede 1,5m boven het geluidscherm;
- M14 bij de brug, naast het brugwachtershuis, 1,5 m boven het geluidscherm (noot: het brugwachtershuis geeft naar verwachting een ca. 3 dB verhoging in het gemeten niveau wegens reflecties)
- M5 tussen posities M4 en M6 ter hoogte van het wegdek, naast de basculekelder.



Figuur 25: Octaafbandspectra van het equivalente geluidsdrukkniveau gemeten bij de brug op M4, M6, en bij het referentiepunt M10.



Figuur 26: Correctiefactoren C_{w1} en C_{w2} in octaafbanden bepaald volgens de brugtoeslagmethode



Figuur 27: Octaafbandspectra van het equivalente geluiddrukkniveau gemeten bij de brug op M4 (-3 m), M5 (0 m), M6 (+3 m), bij het referentiepunt M10 (+3 m) en bij meetpunten M13 (referentie) en M14 (brug), beide 1,5m boven het geluidscherm.

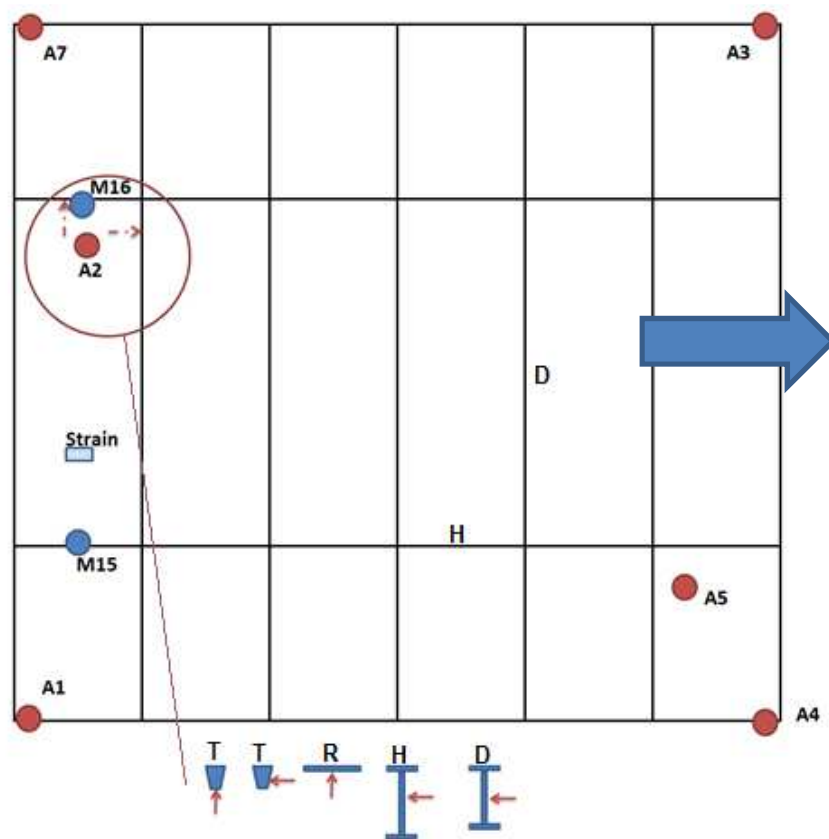
3.7 Geluid- en trillingsmetingen aan de brug

3.7.1 Doel en opzet van de metingen

Een reeks geluid- en trillingsmetingen is uitgevoerd aan de brug met als doel het volgende te karakteriseren:

- belangrijkste eigenfrequenties, trilvorm en demping, zowel ten gevolge van het verkeer als van hamermetingen;
- onderlinge gemiddelde trillingsniveaus van plaatdelen van de brug die bepalend zijn voor de geluidafstraling;
- onderlinge bijdrage van het oprijden, overheen- en afrijden rijden uit microfoonmetingen onder de brug.

Voor de metingen werden 2 microfoons onder de hoofdliggers en zes versnellingsopnemers op enkele posities onder de brug geplaatst, zoals weergegeven in figuur 28.



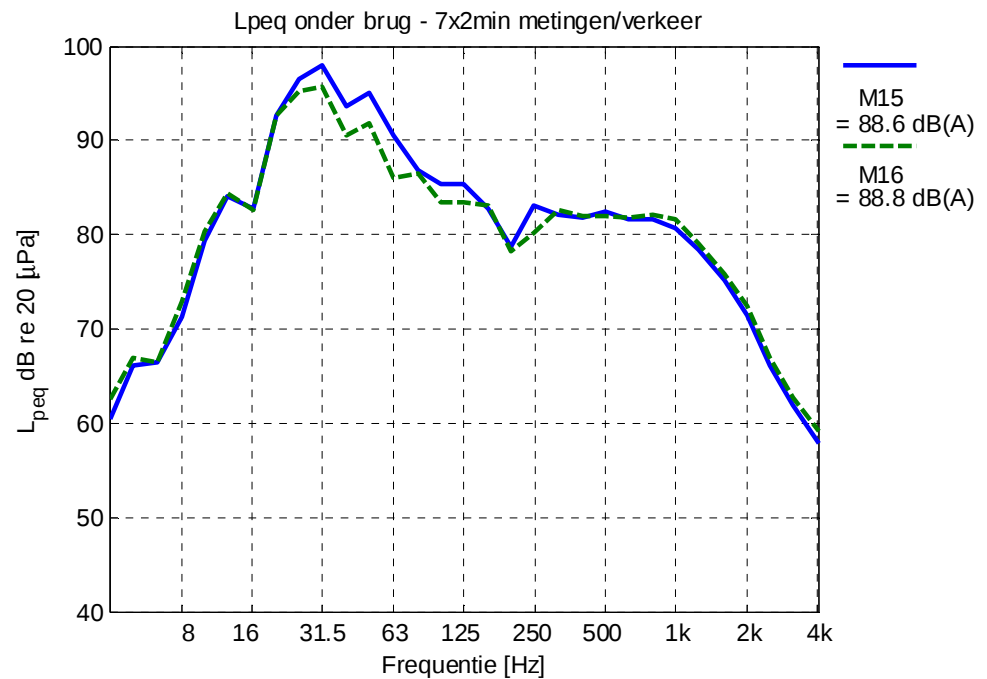
Figuur 28: Posities van microfoons en trillingsopnemers onder de brug, bovenaanzicht. Rijrichting van het verkeer is naar rechts; scharnierlijn van de bascule is rechts. Opnemers A1/A3/A4/A7 zijn op de buitenste randbalken aangebracht. Trillingsopnemer A2 is steeds verplaatst zoals aangegeven onder de figuur en in dezelfde richting met de hamer aangestoten. T= Troglijger, R=rijdek, H=hoofdligger, D=dwarslijger.

3.7.2 Spectra van geluid en trillingen onder de brug

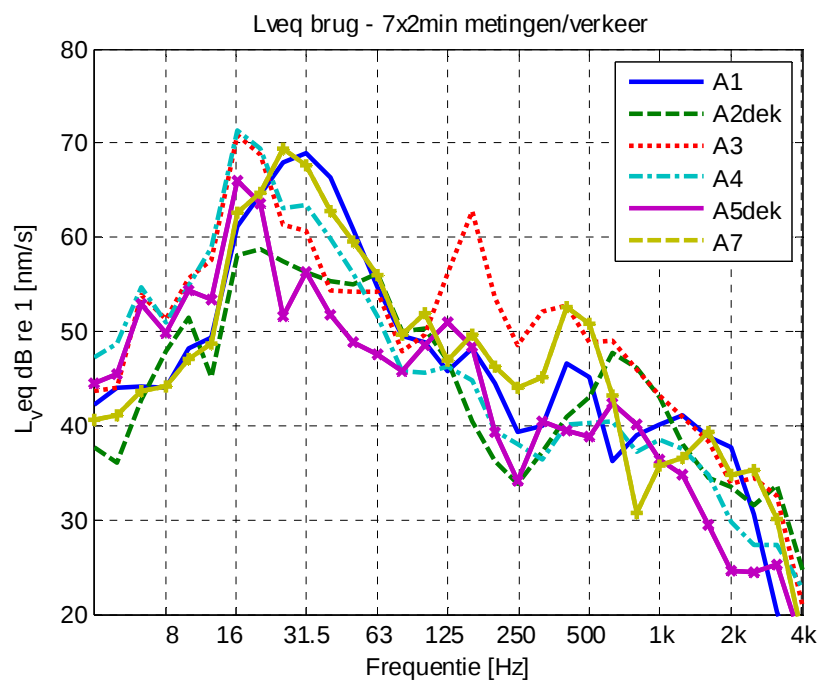
De equivalente geluiddrukspectra van de twee punten onder de brug gemeten gedurende 14 minuten zijn weergegeven in figuur 29.

Equivalent trillingsspectra op punten A1-A7 (hoekpunten en rijdepunten) gemeten tijdens normaal verkeer staan in figuur 30. Deze zijn als trillingssnelheden weergegeven vanwege de directe relatie met de geluiddruk.

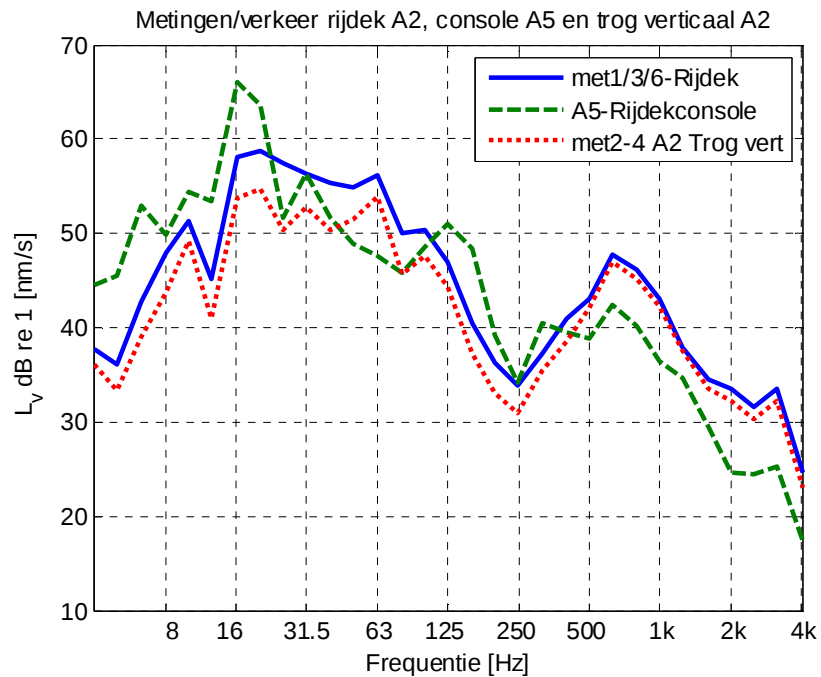
De trillingsopnemer A2 is verplaatst naar verschillende posities op de hoofdligger, dwarslijger en troglijger. De daaruit resulterende spectra zijn in figuren 31 en 32 weergegeven.



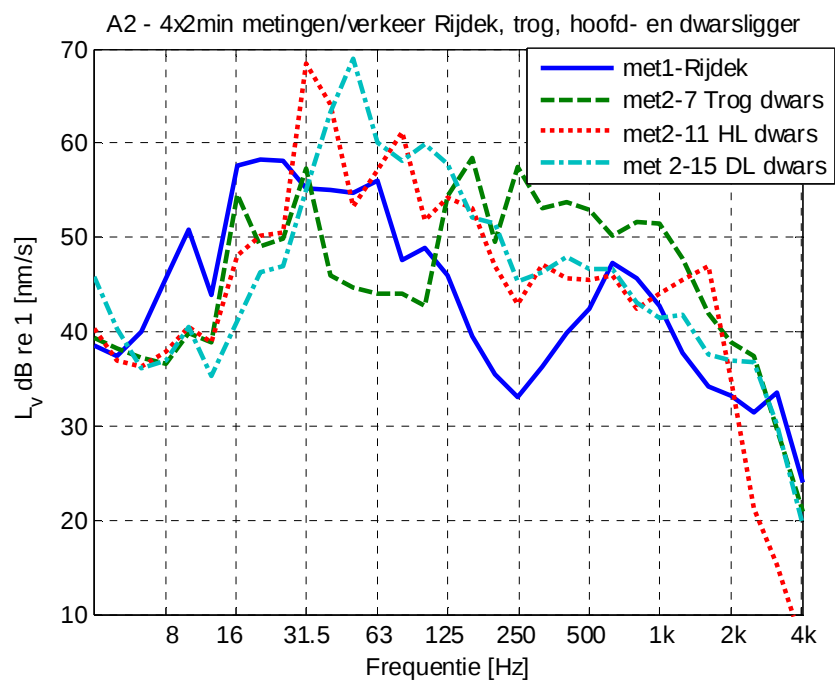
Figuur 29: Equivalente geluiddrukspectra van de twee punten onder de brug gemeten gedurende 14 minuten tijdens de middag.



Figuur 30: Equivalente trillingsspectra van hoekpunten van het brugdek en punten onder het rijdek, gemiddeld over 14 minuten tijdens normaal verkeer.



Figuur 31: Equivalente trillingsspectra van punten onder het rijdek en op de trogprofiel verticaal gemiddeld over 2 minuten tijdens normaal verkeer.



Figuur 32: Equivalente trillingsspectra van het rijdek, het trogprofiel dwars, de hoofdligger dwars en de dwarsligger dwars, gemiddeld over 2 minuten tijdens normaal verkeer.

In de trillingsmetingen zijn duidelijke eigenfrequenties van de componenten terug te zien (figuren 30-32), die overeenkomen met berekende eigenfrequenties (zie tabel 5). Hierbij wordt verondersteld dat de aanstoting van de brug gemiddeld over de verkeersstroom breedbandig is.

Punten A1 en A7 (consoles) aan de oostkant van de val vertonen een resonantie bij 32 Hz, samen met het rijdek bij A5 en de hoofdligger dwars.

Punten A3, A4 en A5 (consoles) aan de westkant van de val (scharnier) resoneren sterk rond 16-20 Hz samen met de rijdek middenplaten.

De dwarsverstijvers vertonen een resonantie rond 50 Hz.

Het rijdek met consoledekken, hoofd- en dwarsliggers hebben alle laagste eigenfrequenties en de hoogste trillingsresponsies tussen 16 en 125 Hz. Vanaf 160 Hz hebben de trogprofielen de hoogste trillingsresponsies en resonanties.

De resonantie van het hoekpunt A3 bij 160 Hz is mogelijk te verklaren door een koppeling met de trogprofielen die eigenfrequenties bij 123 en 163 Hz hebben. Onbekend is waarom dit alleen op dit hoekpunt optreedt.

Er zijn ook resonantiepieken onder 16 Hz te zien, echter deze liggen qua niveau veel lager en zijn minder geprononceerd. Het gaat waarschijnlijk om globale trilvormen van de hele brug die slecht geluid afstralen vanwege de lange golflengte in de lucht (34m bij 10 Hz) in verhouding tot de brugafmetingen.

3.7.3 Schatting van akoestische en mechanische eigenfrequenties

Een schatting van te verwachten eigenfrequenties van de akoestische ruimte onder de brug zijn in tabel 4 opgenomen, op basis van trilvormen van de lucht bij een halve en een hele golflengte.

Tabel 4: Akoestische eigenfrequenties van de ruimte onder de brug, berekend uit de passende halve en hele golflengtes.

	Afmeting [m]	Eigenfrequentie bij halve golflengte [Hz]	Eigenfrequentie bij hele golflengte [Hz]
Breedte	21	8	16
Lengte (rijrichting)	17	10	20
Hoogte (water- rijdek)	6	28	56

Benaderde eigenfrequenties van de belangrijkste plaatcomponenten van de val berekend met analytische modellen (Blevins [4]) voor eenvoudige verstijfde platen zijn opgenomen in tabel 5. Zowel de akoestische eigenfrequenties als de mechanische eigenfrequenties liggen dicht op gemeten resonantiefrequenties, met name in het frequentiegebied 14 tot 30 Hz.

Gevolg is dat geluidafstraling van de brugval bij mechanische eigenfrequenties door de akoestische responsie verder wordt versterkt. Dit kan vooral gebeuren bij 16, 20, 28 en 56 Hz, frequenties die in de trillingsresponsies van de val bij benadering ook

terug te vinden zijn. Belangrijk is ook dat de eigentrilvormen van rijdek, hoofdligger secties en dwarsliggers in richtingen bewegen die de akoestische eigentrilvormen kunnen aanstoten:

- rijdek verticaal: 15 en 29 Hz, akoestisch in hoogterichting 28 Hz;
- hoofdliggersecties dwars: 23 Hz, akoestisch in langsrichting 20 Hz;
- dwarsliggers dwars: 14 Hz, akoestisch in breedterichting 16 Hz.

Dit toont aan dat er bij lage frequenties een goede koppeling tussen brugtrillingen en de akoestische resonanties van de tunnelruimte mogelijk is.

Tabel 5: Indicatieve eigenfrequenties van stalen brugcomponenten, berekend met formules voor verstijfde platen [4].

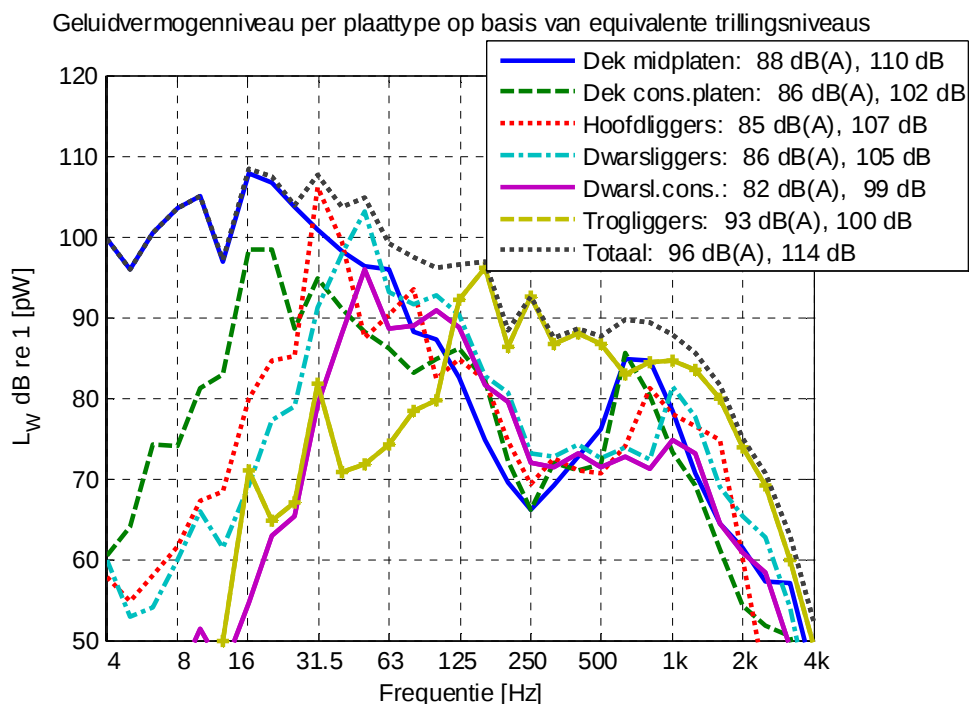
Component (benadering)	Eerste eigenfrequentie
Plaatveld rijdek 21,2x17 m, 18 mm dik met hoofd- en dwarsliggers 1,5 hoog, 15 mm dik, randvoorwaarden rondom opgelegd (SSSS), 79 ton	15 Hz
Plaatveld rijdek 12,2x17 m, 21 mm dik met 7 dwarsliggers 1,5 hoog, 15 mm dik, randvoorwaarden SSSS, 50 ton	29 Hz
Rijdek plaat 12,2x2,64 m, 18 mm dik met 10 verstijvers 12x350 mm randvoorwaarden SSSS, 8,6 ton	97 Hz
Trogwand 2,64x0,35 m, 8 mm dik, randvoorwaarden SSSS, 58 kg.	163 Hz
Trogwand 2,64x0,35 m, 6 mm dik, randvoorwaarden SSSS, 44 kg.	123 Hz
Hoofdliggersectie, 1,5x2,64 m, 15 mm dik, randvoorwaarden SSSS, 435 kg.	23 Hz
Dwarsliggersectie, 1,45x12,2 m, 12 mm dik, randvoorwaarden SSSS, 1,7 ton	14 Hz

3.7.4 Berekening van het geluidvermogen uit trillingsniveaus

Uit gemeten trillingsniveaus, de plaatafmetingen van rijdek, trogliggers, hoofd- en dwarsliggers en de berekende afstraalfactor kan een indicatief geluidvermogen van deze componenten worden geschat, analoog aan de TNO-methodiek toegepast voor stalen spoorbruggen [6]. Dit staat in figuur 33, samen met het totale geluidvermogen niveau. Dit is een globale schatting, afhankelijk van de gekozen meetposities- en tijden, vereenvoudigde hoofdafmetingen en aannames voor de afstraalfactor. De gebruikte plaatgegevens staan in tabel 6. De totale oppervlakken van de dekplaten en de zijden van de trogliggers zijn verreweg het grootste.

Tabel 6: Plaatgegevens voor de berekening van het geluidvermogen.

	Lengte [m]	Breedte [m]	Dikte [mm]	Aantal	Baffle factor	Opp. [m ²]
Dek middenplaten	12,2	2,64	18	6	1	193,2
Dek consoleplaten	4,5	2,64	18	12	0	142,6
Hoofdliggers	16,95	1,49	15	2	0	50,5
Dwarsliggers	12,2	1,447	12	7	0	123,6
Dwarsliggers console	4,5	0,7	12	14	0	44,1
Trogligger zijde tussen hoofdliggers	2,64	0,35	8	6x28x2=36	0	310,5
Trogligger zijde 3 trogliggers onder beide consoles	2,64	0,35	6	6x6x2=72	0	66,5



Figuur 33: Equivalente geluidvermogenspectra van het rijdek midden, rijdek consoles, de trogprofielen, de hoofdliggers, de dwarsliggers en totaal, op basis van trillingsmetingen tijdens normaal verkeer. The totale dB(A) en dB(lin) niveaus zijn bepaald voor 20 Hz- 4 kHz.

Hieruit is te zien dat onder 125 Hz de volgende onderdelen een belangrijke bijdrage hebben in het totale geluidvermogen:

- het rijdek (midden- en consoleplaten) bij 16-63 Hz;
- de hoofdliggers bij 32 en 80 Hz;
- de dwarsliggers bij 50 en 100 Hz.

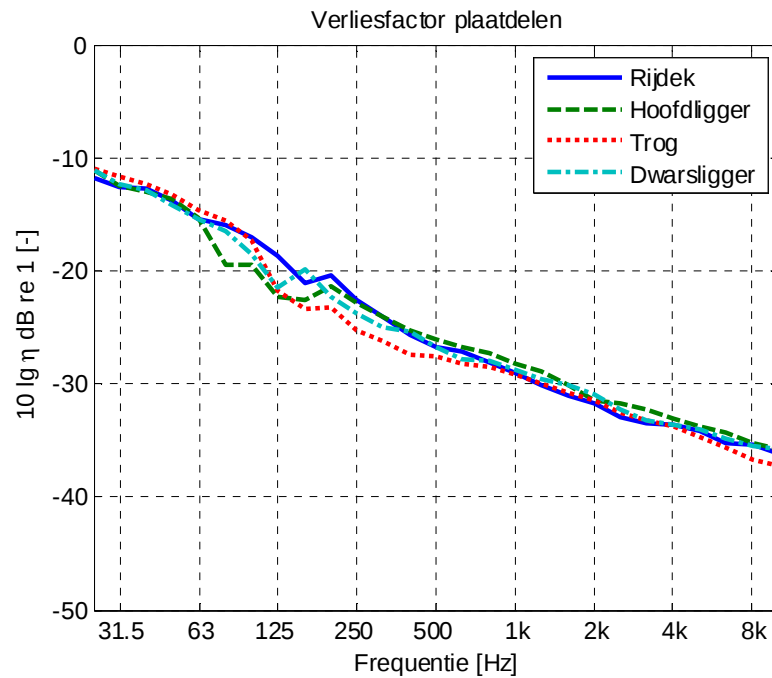
Boven 125 Hz is de bijdrage van de trogprofielen grotendeels dominant, behalve bij 600-800 Hz waar het rijdek ook bijdraagt.

De kritische frequentie, waarbij de platen beter gaan afstralen ligt voor het rijdek van 18 mm bij 666 Hz, voor de hoofdligger van 15 mm bij 800 Hz en voor de dwarsligger van 12 mm bij 1 kHz. Deze frequenties zijn precies terug te zien in de spectra. Voor de 8 mm dikke troglijgigerwanden ligt de kritische frequentie bij 1,5 kHz, waar het spectrum ook hoger is. Het feit dat de troglijggers vanaf 125 Hz domineren ligt aan hun hogere trillingsniveau en het grote totale oppervlak.

3.7.5 Dempingsverliesfactor

Uit de trillingsmetingen is ook de dempingsverliesfactor η van verschillende plaatvelden bepaald met behulp van hameraanstoting, zowel met een rubber als stalen hamerkop. De dempingsverliesfactor staat in figuur 34 voor het rijdek, de hoofd- en dwarsliggers en de troglijggers. De troglijgiger heeft een lichtere damping dan de overige plaatdelen tussen 125-500 Hz. De responsniveaus ten gevolge van hameraanstoting kwamen ruim boven de achtergrondsignalen van het verkeer uit, en werden steeds over 10 of meer slagen gemiddeld. Deze meting is echter in nauwkeurigheid beperkt doordat vaak ook passagetrillingen aanwezig waren. De gevonden dempingsniveaus zijn vergelijkbaar met andere bruggen met

trogprofielen die relatief lager gedempt zijn dan de overige profielen en het rijdek, vooral tussen 200-500 Hz. Daarbij moet worden bedacht dat de verschillende plaatvelden onderling gekoppeld zijn, waardoor trillingsenergie met hoger gedempte platen kan worden uitgewisseld.

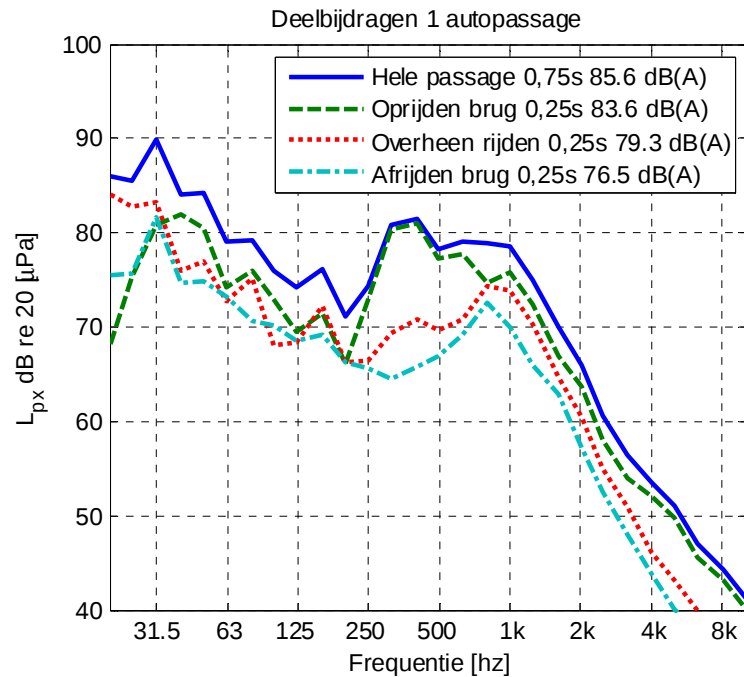


Figuur 34: Niveau van de dempingsverliesfactor van het rijdek, de trogprofielen, de hoofdliggers en dwarsliggers.

3.7.6 Analyse van delen van een voertuig passage op de brug

De bijdragen van delen van de passage van een enkele auto zijn als spectra getoond in figuur 34. De passage is opgedeeld in drie tijdintervallen: Oprijden van de brug, overheen rijden en afrijden van de brug.

Uit de spectra is duidelijk te zien dat het oprijden van de brug het sterkst bijdraagt aan het totale geluid van een voertuigpassage.

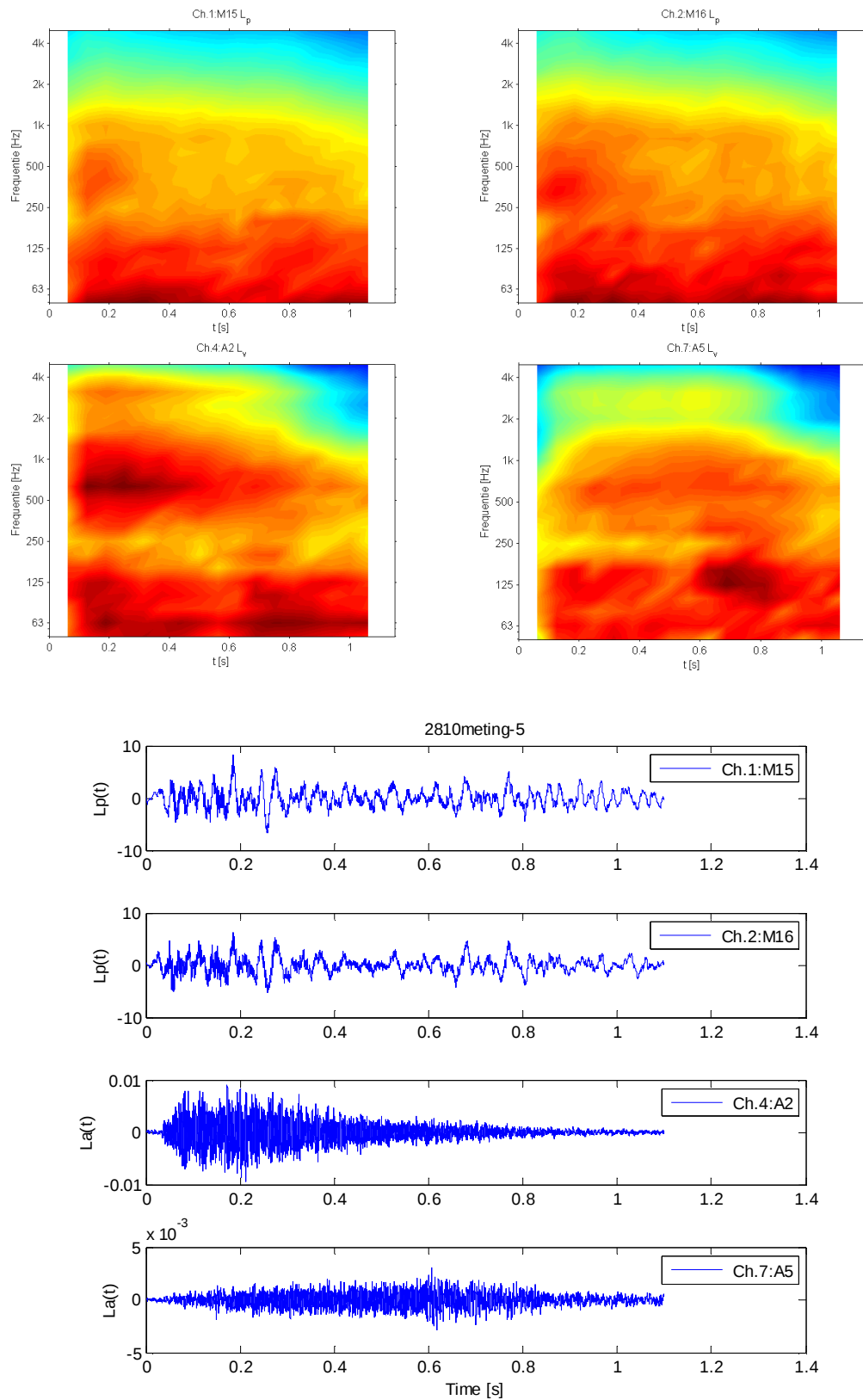


Figuur 35: Expositieniveauspectra van de geluidruk van delen van een autopassage over de brugval.

In figuur 36 zijn de spectrogrammen en tijdsignalen weergegeven voor dezelfde autopassage over de brug voor microfoonposities M15 en M16 onder de brug en voor de trillingsopnemers op posities A2 en A5 onder het rijdek. Hierin is duidelijk de hogere bijdrage van het oprijden te zien. De hoorbare impacts van de 2 banden liggen aan het begin van het signaal.

Het oprijden geeft de hoogste geluid- en trillingsresponsie boven 250 Hz. Bij 50-63 Hz is hoge responsie in de geluiddruk te zien voor de hele passage, voor de trillingen bij het op- en afrijden onder 125 Hz en bij het afrijden bij 125 Hz.

Hieruit is te concluderen dat boven 250 Hz het oprijden het meeste geluid produceert, voor het laagfrequente geluid onder 250 Hz is dat meer verdeeld over de hele passage.



Figuur 36: Spectrogrammen (boven) van de geluidsdruk op posities M15, M16, en van de trillingssnelheid van het rijdek op punten A2 en A5 van één autopassage over de brugval. Onder, de overeenkomstige tijdsignalen, waarbij de trillingen als versnellingssignaal zijn weergegeven.

3.8 Antennemetingen

TNO heeft Sorama BV opgedragen antennemetingen uit te voeren ter ondersteuning van de overige metingen met als doel de visualisering van de deelbijdragen van boven- en onderkant van de brug.

De opnames zijn gemaakt met een compacte meerkanaals array die op enkele posities achtereenvolgens is geplaatst. In de onderstaande figuren worden resultaten getoond van positie 1 op ca. 50 m van de brug en punt 3 vlak naast de brug, omhoog gericht naar de onderkant.

De mogelijkheden van antennes zijn zeer beperkt voor lage frequenties, echter werd het hier nuttig geacht extra inzicht te verkrijgen in de geluidafstraling over een breed frequentiegebied tot 2 kHz. Laagfrequente bronnen zijn in het algemeen moeilijker te lokaliseren vanwege de grote golflengtes.

Het smalbandige frequentiespectrum van het ongewogen geluidrukniveau met lijnafstand 25 Hz is voor alle meetpunten in figuur 37 weergegeven.

Figuur 38 toont de projectie van de geluiddruk op de zijde van de brug, gemeten op positie 1, gemiddeld over 5 seconden voor gemiddeld verkeer, frequentiebereik 1-2000 Hz en ongewogen. Dit beeld geeft al een indicatie van de dominante bijdrage van de onderzijde van de brug.

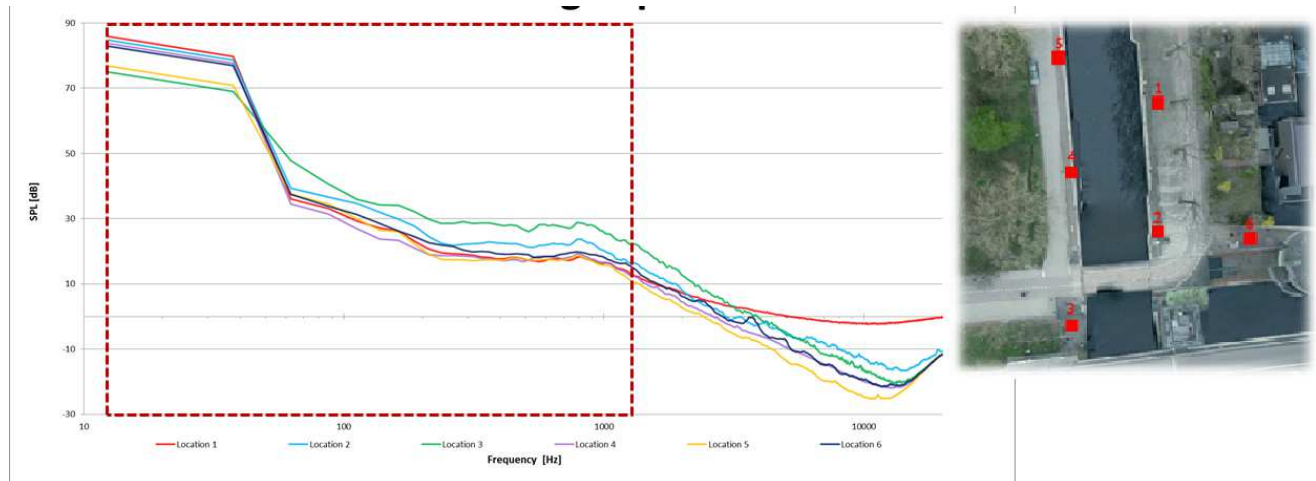
In figuur 39 zijn twee afbeeldingen weergegeven van een vrachtwagenpassage bij oprijden en afrijden van de brug, beide gemiddeld over 1 seconde. Bij het oprijden is er ook boven de brug een bijdrage, waarschijnlijk van het motorgeluid bij lage frequenties. Zowel bij op- als afrijden is de onderkant van de brug een dominante bron.

Figuur 40 toont een projectie van de geluidintensiteit op zes punten aan de zijde van de brug, opgenomen vanuit positie 1, bij normaal verkeer en tijdens passage van een vrachtwagen. Het niveauverloop op deze punten is voor 5 seconden uitgezet. Frequentiebereik is 1-2000 Hz. Hierin is te zien dat op de punten links naast de betonnen brug het geluidniveau veel lager is dan de overige punten vlak bij de brug.

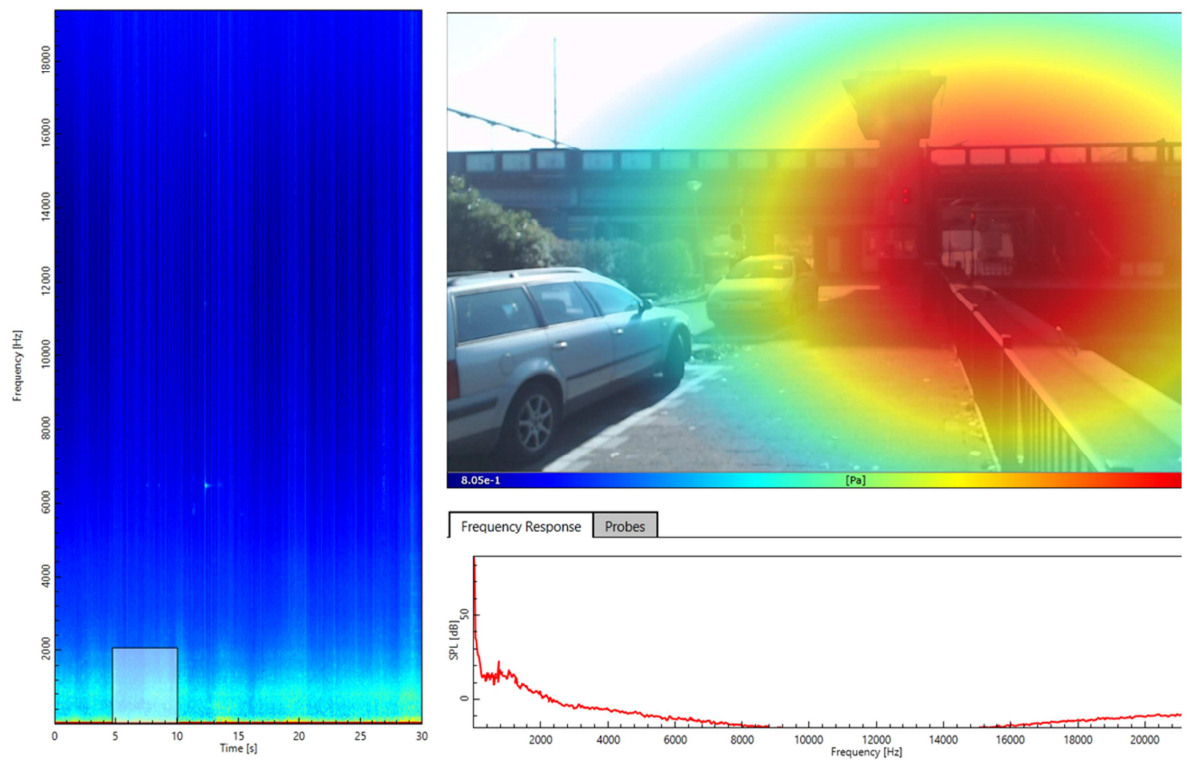
Tot slot staan in figuren 41 en 42 opnames vanuit punt 3 rechts naast de brug, van autoverkeer en van een vrachtwagen, voor frequentiebereik 1000-2000 Hz en 1-2000 Hz, en voor meetduur 0,5 en 1,5 seconden.

Deze resultaten lijken een indicatie te geven dat er vooral aan de linker kant van het brugdek het meeste geluid afkomstig is.

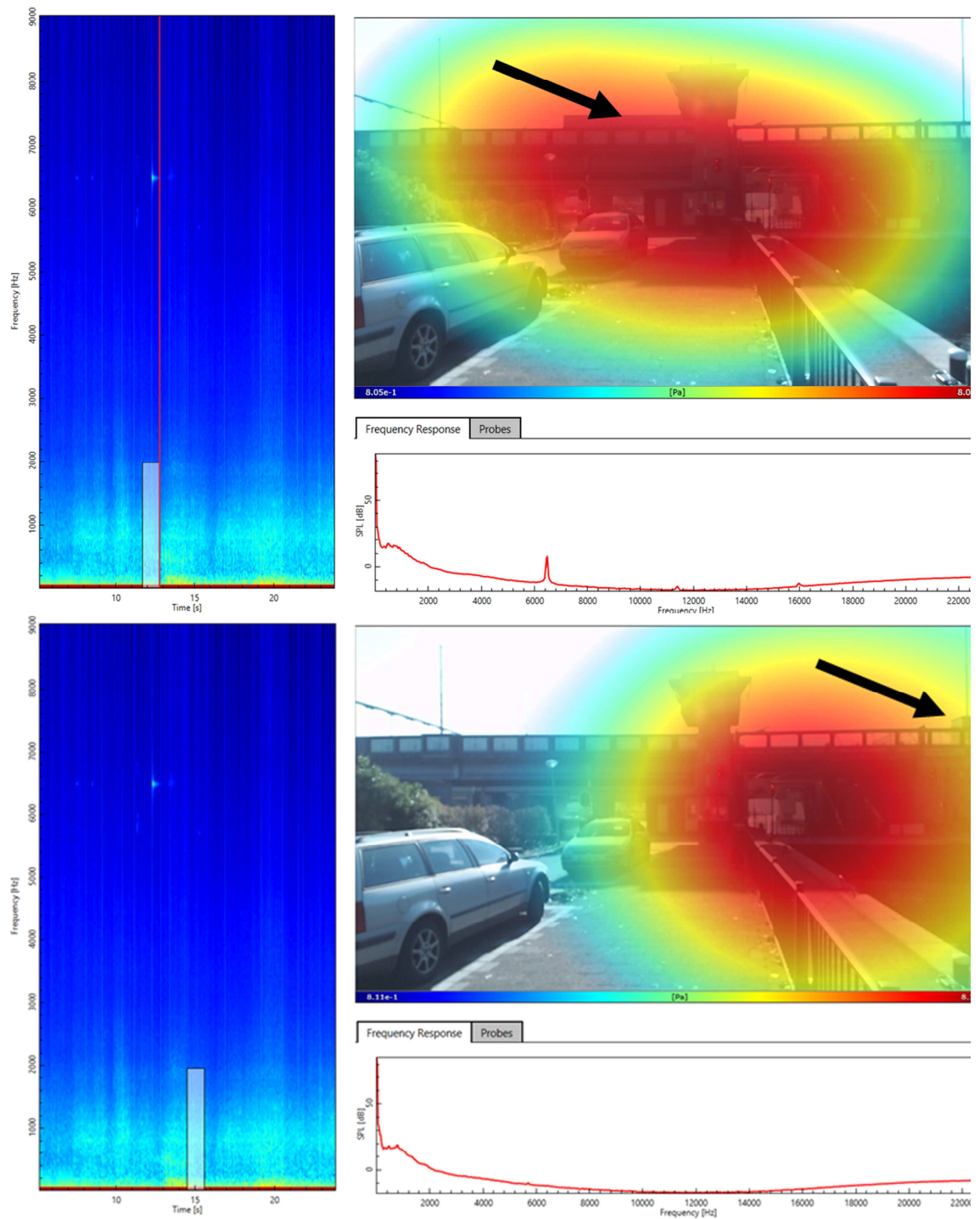
Samenvattend geven de antennemetingen de indicatie dat de onderkant van de brug dominant is voor het hele frequentiegebied en dat de linker deel van het brugdek het sterkst geluid afstraalt tijdens het oprijden van zowel auto's als overige voertuigen.



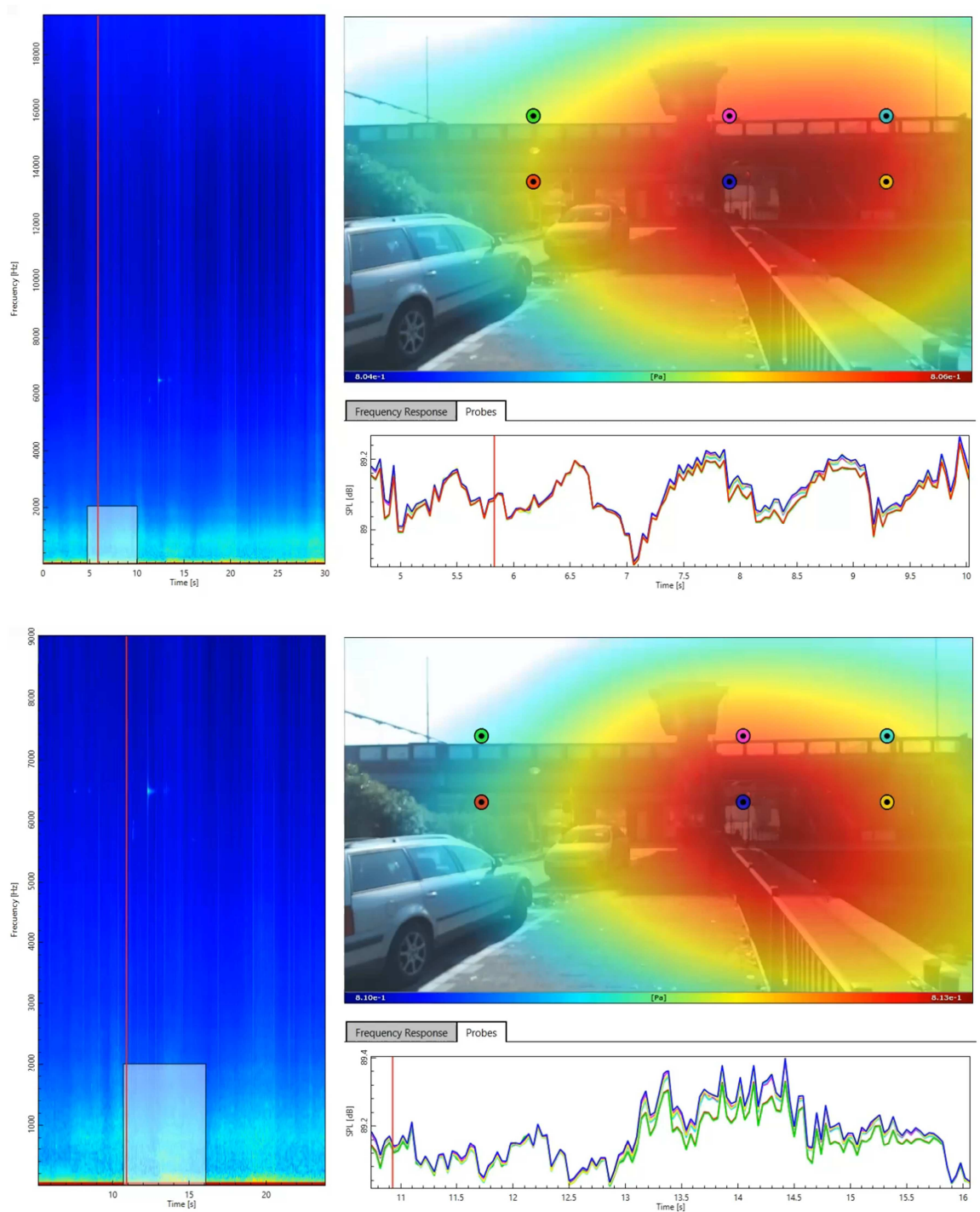
Figuur 37: Gemeten geluiddruk spectra met behulp van antenne op 6 verschillende punten ten opzichte van de brug, met middelingstijd 30 seconden.



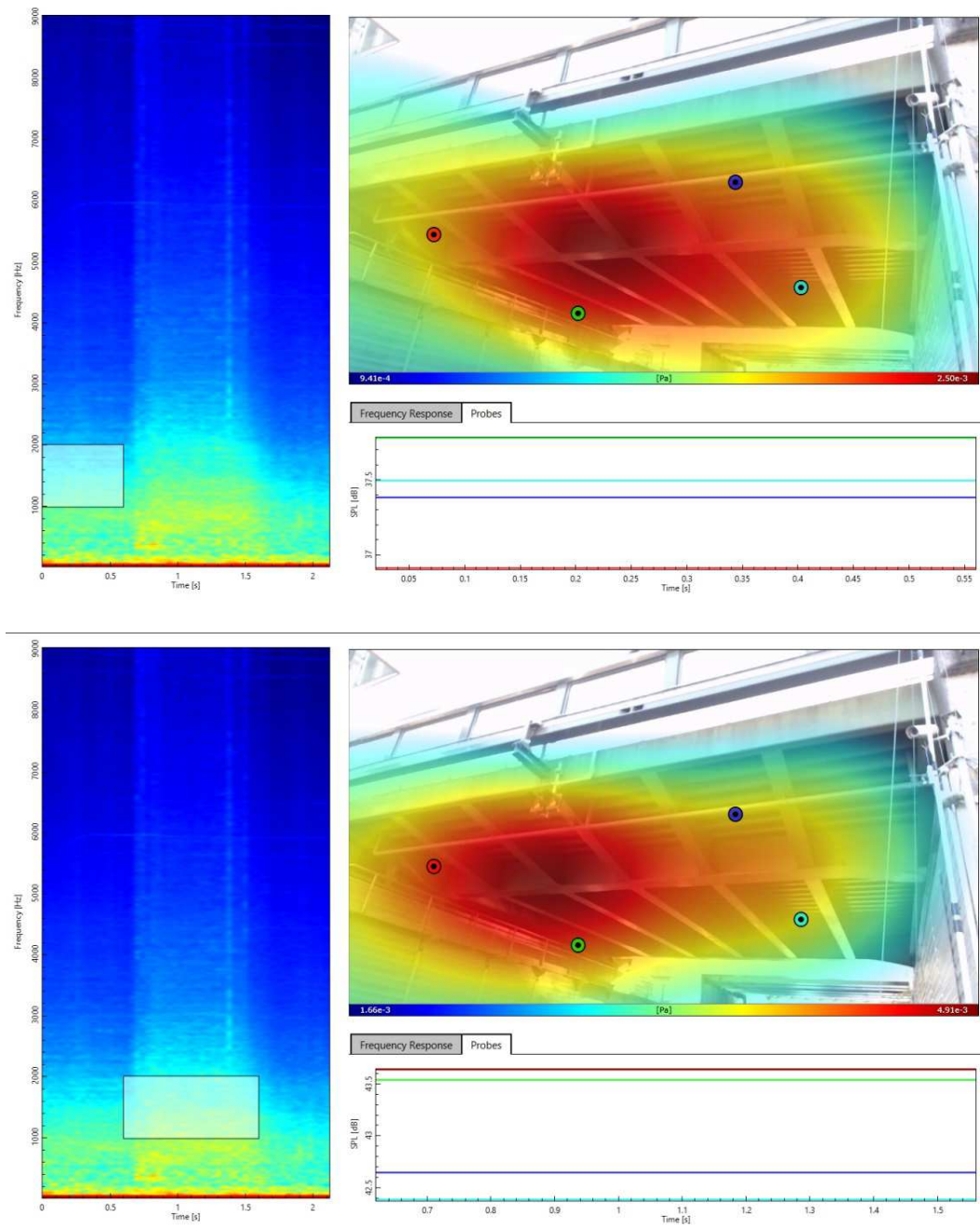
Figuur 38: Antenneafbeelding op positie 1, middeling over 5 seconden gedurende gemiddeld verkeer, projectie van de geluidintensiteit op de zijde van de brug, frequentiebereik 1-2000 Hz.



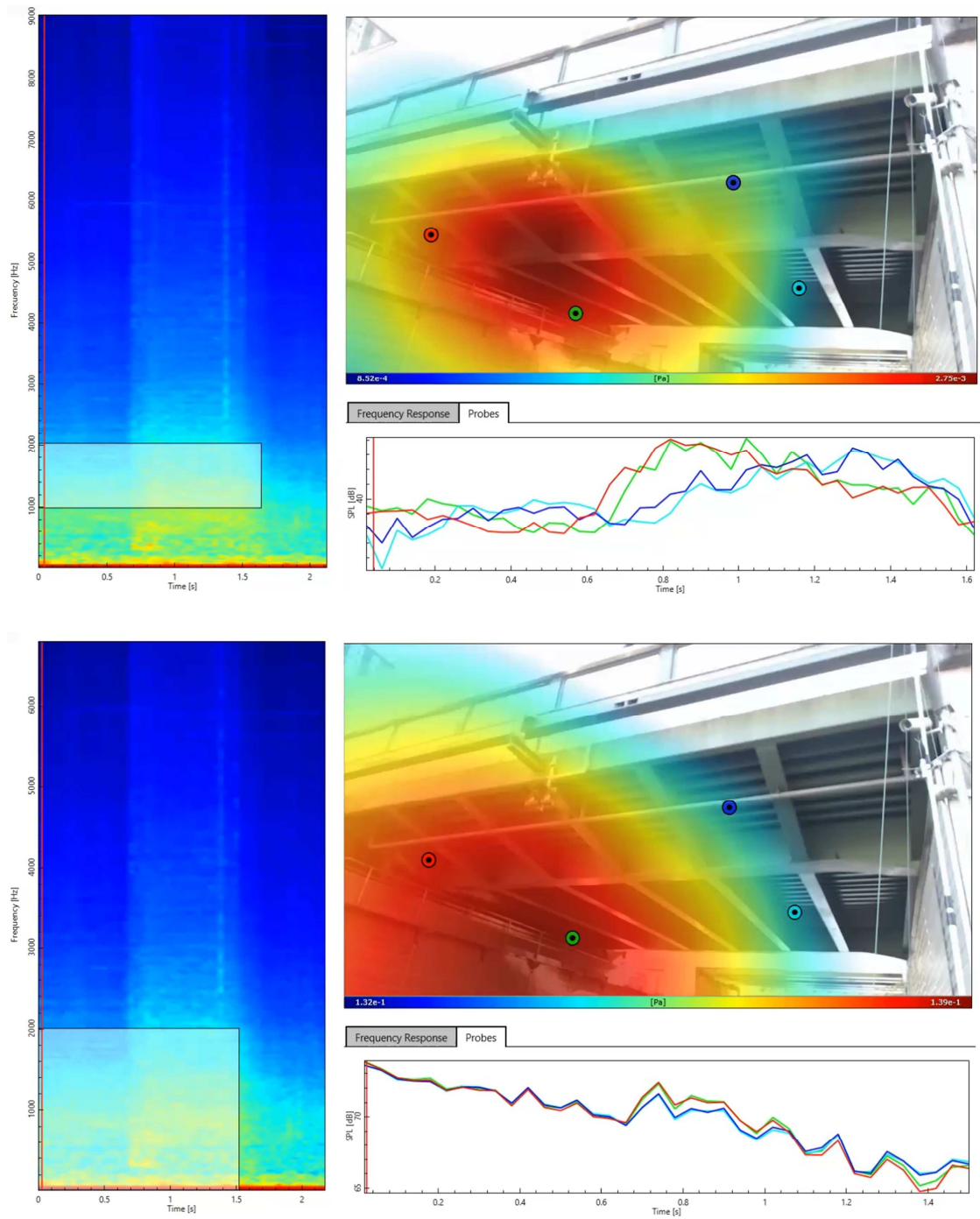
Figuur 39: Antenneafbeelding op positie 1, middeling over 1 seconde terwijl een vrachtauto de brug oprijdt (boven) en afrijdt (onder), projectie van de geluidintensiteit op de zijde van de brug, frequentiebereik 1-2000 Hz.



Figuur 40: Antenneafbeelding op positie 1, niveauverloop over 5 seconden, projectie van de geluidintensiteit op zes punten aan de zijde van de brug, frequentiebereik 1-2000 Hz; boven: bij normaal verkeer; onder: tijdens passage van een vrachtwagen.



Figuur 41: Antennebeelden van de onderkant van de brug, boven: autoverkeer 0,5 s, en onder: vrachtwagenpassage, 1 s, 1000-2000 Hz.



Figuur 42: Autoverkeer en vrachtwagenpassage samen, 1,5 s. Boven:1000-2000 Hz, onder: 0-2000 Hz.

3.9 Conclusies uit alle metingen

De conclusies uit alle metingen worden hier nogmaals samengevat.

Metingen bij ontvangpunten en hinder

De hinder bij de woningen vlak naast de brug bij M1 en langs de sluis wordt bepaald door zowel het laagfrequente geluid onder 125 Hz van een deel van de zware en middelzware voertuigpassages, als door het rol- en voeggeluid van de brug, dat vooral afkomstig is door lichtere voertuigen wegens hun hogere aantallen en rijsnelheid. Woningen op iets grotere afstand zoals bij M2 en M3 hebben vergelijkbare laagfrequent geluid als bij M1 en iets lagere dB(A)- niveaus ten gevolge van het geluid van de brugvoegen en het brugwekdek, die steeds minder bijdragen met toenemende afstand en smallere hoek ten opzichte van de weg. Het laagfrequente, vaak impulsief geluid onder 125 Hz is afkomstig van de brugval en wordt aan de onderkant door de tunnel versterkt waardoor de onderkant domineert. Niet alle zware voertuigen veroorzaken laagfrequent geluid, en middelzware voertuigen waaronder ook sommige bestelauto's lijken ook soms laagfrequent geluid te veroorzaken, zij het in mindere mate.

De geluidniveaus bij alle ontvangpunten zijn voldoende hoog om substantiële hinder te veroorzaken op alle drie ontvangpunten, met momentane L_C - L_A niveaus van rond de 15 dB en L_C piekniveaus van boven de 80 dB. Overdag kunnen rond 50-100 laagfrequente pieken per uur optreden die bij alle woningen goed hoorbaar zijn. Hoewel 's nachts minder zware voertuigen rijden is er desondanks hinder omdat ook andere voertuigen zoals bestelauto's pieken kunnen veroorzaken, het achtergrondniveau lager is en incidentele passages van zware voertuigen meer opvallen in de kleinere verkeersstroom. Dit komt tot uiting in hogere L_C - L_A niveaus bij de ontvangpunten.

De onderzijde van de brug straalt het meeste voeg- en rolgeluid af doordat het niet afgeschermd is, een grote, matig gedempte afstralende constructie heeft en doordat reflecties in de tunnel optreden. Het geluidscherm op de brug heeft beperkt effect vanwege de hoge bijdrage van de onderzijde van het brugdek.

De onderlinge bijdragen van rijstroken zijn nog niet bekend. Uit de data is echter te zien dat vrachtauto's en sommige middelzware voertuigen op alle rijstroken potentieel laagfrequent geluid kunnen produceren. Deze voertuigen rijden het meest op de derde en de vijfde rijstrook. De bijdragen hangen sterk af van de actuele verkeersstroom op iedere rijstrook, die gedurende de dag sterk kan variëren.

De individuele laagfrequente pieken bevatten bij hoge niveaus vaak ook middenfrequente bijdragen, hetgeen wijst op stootexcitatie in de constructie. Dit is vooral relevant voor de positie M1 dicht bij de brug.

Brugtoeslag

De brugtoeslag is 10-15 dB onder 63 Hz, aflopend naar 0 dB rond 2 kHz. De brugtoeslag zou hoger zijn boven 250 Hz indien er geen voegovergang in de buurt van het referentiepunt zou liggen.

Geluid- en trillingsmetingen onder de brug

De geluidmetingen onder de brug vertonen hoge niveaus tussen 16 en 125 Hz, die ook bij de ontvangpunten optreden. In de trillingsmetingen zijn duidelijke eigenfrequenties van de componenten terug te zien. Punten aan de oostkant van de val vertonen een resonantie bij 32 Hz, samen met het rijdek aan de westkant en de hoofdligger dwars. De rijdek consoles resoneren sterk rond 16-20 Hz samen met de rijdek middenplaten. De dwarsverstijvers vertonen een resonantie rond 50 Hz. Het rijdek met consoledekken, hoofd- en dwarsliggers hebben alle laagste eigenfrequenties en de hoogste trillingsresponsie tussen 16 en 125 Hz. Vanaf 160 Hz hebben de trogprofielen de hoogste trillingsresponsie en geluidafstraling.

Berekende en gemeten eigenfrequenties van zowel de luchtvolume onder de brug (16/20/28 Hz) als van het brugdek (15 Hz), dekdelen (29 Hz), hoofdliggersecties (23 Hz), dwarsliggers (14 Hz) en trogprofielen (163 Hz) zijn goed terug te vinden in de meetresultaten.

De eigentrilvormen van rijdek, hoofdligger secties en dwarsliggers bewegen in richtingen die de akoestische eigentrilvormen kunnen aanstoten:

- rijdek verticaal: 15 en 29 Hz, akoestisch in hoogterichting 28 Hz;
- hoofdliggersecties dwars: 23 Hz, akoestisch in langsricting 20 Hz;
- dwarsliggers dwars: 14 Hz, akoestisch in breedterichting 16 Hz.

Hierdoor kan er bij lage frequenties een sterke koppeling tussen brugtrillingen en akoestische resonanties van de tunnelruimte optreden.

Het geluidvermogen is uit de gemeten trillingen, afstraalfactoren en totale oppervlak van de brugcomponenten berekend en toont aan dat onder 125 Hz de sterkste bijdrage afkomstig is van

- het rijdek (midden- en consoleplaten) bij 16-63 Hz;
- de hoofdliggers bij 32 en 80 Hz;
- de dwarsliggers bij 50 en 100 Hz.

Boven 125 Hz is de bijdrage van de trogprofielen grotendeels dominant, behalve bij 600-800 Hz waar het rijdek bijdraagt, en bij 800-1600 Hz, waar de hoofdliggers even sterk als de trogliggers bijdragen.

Uit de dempingsmeting volgt dat de verschillende componenten matig gedempt zijn, vergelijkbaar met andere bruggen. De trogprofielen zijn lichter gedempt.

Uit analyse van een aparte autopassage is te zien dat het oprijden van de brug het meeste geluid produceert. Bij middelzware en zware voertuigen kan het laagfrequent geluid gedurende de hele passage hoog zijn.

Antennemetingen

De antennemetingen bevestigen dat de onderkant van de brug dominant is voor het hele frequentiegebied en dat de linker deel van het brugdek het sterkst geluid afstraalt tijdens het oprijden van zowel auto's als overige voertuigen.

4 Analyse van maatregelen

4.1 Introductie

Er zijn meerdere geluidreducerende maatregelen mogelijk die de hinder kunnen reduceren, zowel voor het laagfrequent geluid als voor het totale dB(A)-niveau van de brug (voegen en rijdek). In paragraaf 4.1 worden de maatregelen eerst apart beschreven waarbij de praktische uitvoerbaarheid wordt beoordeeld en in hoeverre het laagfrequente geluid of het dB(A)-niveau te reduceren is. Het geschatte effect is indicatief en voor zover mogelijk onderbouwd op basis van de meetgegevens of bestaande kennis.

De reducties gelden voor het door de brug afgestraalde geluid, en het geluidniveau op nabijgelegen ontvangpunten.

Vervolgens worden maatregelen geselecteerd voor de bestaande brug in 4.2 en voor de nieuwe brug in 4.3, waarbij een prognose van het te verwachten totale effect in geluidreductie en de hinder wordt gemaakt.

De onzekerheid in de werking van maatregelen is vrij groot vanwege de spreiding in invloedparameters en uiteindelijke wijze van uitvoering. Daarom hebben maatregelen met potentieel grote effectiviteit de voorkeur.

4.2 Afzonderlijke maatregelen

De afzonderlijke maatregelen worden hieronder beschreven met samen met een illustratie waar nodig.

1. Maatregelen onder de brug

1a) Verhoging van de wandabsorptie (verbeteren van absorberende bekleding) op de tunnelwanden onder de brug. Deze zijn voorzien van absorptie cassettes waarvan de huidige effectiviteit onbekend is.

Uitvoerbaarheid: Mogelijk kunnen de huidige cassettes worden vernieuwd en/of verbeterd. Dit is naar verwachting haalbaar, echter duurzaamheid is een aandachtspunt – vervuiling van het materiaal vermindert de absorptie.

Werking op het dB(A)-niveau: Wegens de reeds aanwezig bekleding wordt hiervan een effect van 1-3 dB verwacht. 1 dB als de absorptie nog steeds functioneert.

Werking op het laagfrequente geluid: geen.

Onderbouwing: De tunnelruimte werkt wegens de gladde oppervlakken van het rijdek en het water als een galmkamer dus zal iedere verhoging van de absorptie aan de wanden het geluid helpen beperken. Om dit te kwantificeren moet de nagalmtijd in de tunnel worden gemeten.

1b) Afscherming en/of kapseling van brugplaatdelen die stoot- en rolgeluid afstralen: vooral de trogprofielen, maar ook de dwarsliggers, hoofdliggers en het rijdek. Dit is te optimaliseren aan de hand van de onderlinge bijdragen van plaatdelen van de onderkant van de brug. Afscherming of kapseling dient elastisch te worden opgehangen aan stijve punten van de brug. Kapseling dient sluiten te zijn. Een beperkte uitvoering zou een absorberend scherm aan de buitenkant

vanaf het wegdek tot aan de doorvaarthoogte kunnen zijn. Vele varianten van kapseling en/of afscherming zijn denkbaar. Mogelijk is een afscherming aan de voorkant te combineren met het beweegbare geluidscherm. Daarmee zou ook de opening aan de onderkant van het scherm worden afgedicht.
Uitvoerbaarheid: Beperkingen zijn gewichtstoename van de val en bevestigingsmogelijkheden.
Werking op het dB(A)-niveau: 1-5 dB op het rolgeluid, afhankelijk van de uitvoering. 1 dB bij minimale geluidisolatie of contactgeluid doorgifte naar de afscherming. 5 dB of meer bij optimale uitvoering. 2-3 dB bij alleen scherm aan de buitenkant tot doorvaarthoogte.
Werking op het laagfrequente geluid: Zeer beperkt.
Onderbouwing: Directe afscherming van de componenten, troggen, dek, dwars- en hoofdliggers kan een grote reductie van het dB(A)-niveau opleveren. Het effect wordt dan beperkt door het overige verkeersgeluid. Bij een afscherming aan de buitenkant wordt een deel van het afgestraalde geluid richting ontvanger afgeschermd, terwijl tegelijk het absorberend oppervlak onder de brug wordt verhoogd.



Figuur 43: Voorbeelden van kapseling (links) en afscherming (minder werking) van brugcomponenten (rechts), ter reductie van het middenfrequent geluid van de brugconstructie. De afscherming is mogelijk te integreren met het beweegbare geluidscherm.

1c) Afsluiting van de tunnel door middel van deuren die opengaan tegelijk met de fietsbrug. De deuren moeten tot aan het wateroppervlak reiken.
Uitvoerbaarheid: Nieuwe toegevoegde constructie vereist met aansturing. Akoestische afdichting zal niet eenvoudig zijn.
Werking op het dB(A)-niveau: ca. 5 dB op het rolgeluid en impactgeluid, beperkt wegens de bijdrage van de bovenzijde van de brug.
Werking op het laagfrequente geluid: 5-10 dB afhankelijk van afdichting en laagfrequente geluidisolatie van de deuren. De bijdrage van de bovenzijde van het brugdek is minstens 6 dB lager dan de onderzijde wegens de akoestische resonanties van de tunnel.
Onderbouwing: de reductie van zowel het dB(A)-niveau als het laagfrequent geluid worden bepaald door de geluidisolatie van de hele deurconstructie inclusief eventuele akoestische lekken. Daarnaast is de bovenzijde van de brug een beperkende factor.

1d) Helmholtz resonatoren
Een zijtakresonator kan tunnel resonanties beïnvloeden.
Uitvoerbaarheid: Een Helmholtz resonator zal een relatief groot volume in beslag nemen om de lage frequenties te kunnen beïnvloeden, en specifiek ontwerp vereisen rekening houdend met de optredende akoestische trilvormen. Wegens ruimtebeperkingen wordt dit minder praktisch geacht.
Werking op het dB(A)-niveau: beperkt indien ontworpen voor lage frequenties.
Werking op het laagfrequent geluid: Mogelijk 5-10 dB op specifieke frequenties indien goed ontworpen.
Onderbouwing: Helmholtz resonatoren in leidingsystemen kunnen grote reducties opleveren. Hier is echter sprake van andere geometrische verhoudingen. Numerieke modellering is nodig om dit te onderzoeken.

1f) Opening brugzijde
Als één of beide zijwanden een voldoende grote opening zou hebben (zoals bij een paalconstructie), reduceert de resonantie tussen de tunnelwanden. Het geluid wordt dan echter meer opzij uitgestraald. Dit is mogelijk weer te voorkomen door een gebogen of schuine wand die het geluid naar achteren afbuigt.
Uitvoerbaarheid: Dit vereist een constructief grote ingreep in de ondersteuning van de brug en is waarschijnlijk alleen denkbaar bij een nieuwe brug, en alleen aan één kant wegens de aanwezigheid van de basculekelder.
Werking op het dB(A)-niveau: 0-2 dB
Werking op het laagfrequent geluid: 1-3 dB
Onderbouwing: Reflecterende wanden geven 3 dB verhoging per hoofdrichting: 3 dB voor de zijwanden, 3 dB voor rijdek-water en potentieel 3 dB voor de lengte van de brug.

2. Maatregelen aan de voegovergangen

2a) Alternatieve voegen die de aanstootkracht op de brug meer uitsmeren en verminderen, inclusief volledig schuine voeg. Vooral nodig aan de openende voeg (oostzijde). Een minimale opening is vereist in verband met de uitzetting van de val. Voor de bestaande brug: een vingervoeg of haaientand voeg. Voor een nieuwe brug: een schuine voeg in het wegdek of haaientand vorm. Alleen zinvol als er geen speling in de brugoplegging wordt doorlopen bij passages van zware voertuigen.
Uitvoerbaarheid: Bij een nieuwe brug relatief eenvoudig maakbaar, bij de bestaande brug is dit een substantiële ingreep in verband met benodigde verkeersstremming.
Werking op het dB(A)-niveau: 5-10 dB op het piekniveau afhankelijk van de uitvoering. Maximaal 3 dB op het hele passageniveau van de brug indien het wegdek en de andere voeg onveranderd blijven. Zie ook Rijkswaterstaat norm over geluidseisen aan voegen [3].
Werking op het laagfrequent geluid: Mogelijk 3-6 dB indien goed ontworpen. Met name de beperking van de verticale aanstoting van het brugdek is van belang.
Onderbouwing: Het verschil tussen oprijden en afrijden voor een autopassage is ca. 7 dB. Zowel voor midden- als laagfrequent geluid is het oprijden een grote bron van excitatie vanwege de optredende stapfunctie. Ook voor lage frequenties ontstaat een excitatiestap binnen de eerste meter bij een rijdsnelheid van 80 km/h. Als de brugrand met enkele millimeters dynamisch verplaatst ontstaat ook nog extra verticale aanstoting.

2b) Afsluiting van voegen aan de onderzijde.

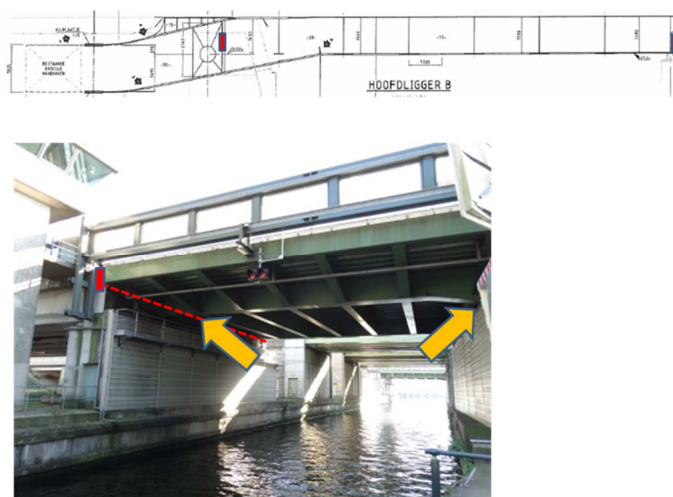
De open onderzijde van de voegen kan met een rubberen afdichting worden gesloten, om de geluidafstraling naar de tunnel te reduceren. Ook de zijkanten aan de uiteinden dienen te worden afgedicht.

Uitvoerbaarheid: Dit wordt constructief uitvoerbaar geacht.

Werking op het dB(A)-niveau: 1-3 dB op het piekniveau van het voeggeluid afhankelijk van de uitvoering, hoger indien in combinatie met verbeterde voeg en/of afscherming of demping van de onderkant van de brug.

Werking op het laagfrequent geluid: geen

Onderbouwing: Het luchtgeluid afkomstig van de banden ten gevolge de voegpassage, dat door de voegopening dringt, wordt hiermee sterk gereduceerd. De effectieve reductie wordt alleen bereikt als ook aan de voeg en de brugconstructie maatregelen worden genomen.



Figuur 44: Afsluiting van de onderkant en zijde van de voegen aan weerszijden van de brug ter reductie van piekgeluid van voegpassages.

2c) Uitlijning van de voegen en het wegdek en verkleining van eventuele hoogteverschillen

De voegen en het wegdek dienen een zo vlak mogelijk verticaal verloop te hebben in langsrichting om de krachten op banden en vooral op het brugdek te minimaliseren.

Uitvoerbaarheid: Hangt af van de keuze en uitvoering van voegen en wegdek en als stellen van het wegdek mogelijk is.

Werking op het dB(A)-niveau: 0-3 dB op het piekniveau zowel in het luchtgeluid van de banden als het geluid afgestraald door de brug.

Werking op het laagfrequent geluid: Potentieel 0-3 dB afhankelijk van de uitgangstoestand.

Onderbouwing: Indien sprake is van een op- of afstap tussen voeg en wegdek, dan wordt de excitatiekracht verhoogd. Dit werkt vergelijkbaar met een spoorstaafvoeg, waar ook impact ontstaat. Ook met een vlakke overgang ontstaat een plotselinge aanstoting ten gevolge van een stapfunctie op de val.

2d) Verkleining van de voegspleetopening
De voegen en het wegdek dienen een zo continu mogelijk verloop te hebben in langsrichting om de krachten op banden en vooral brugdek te minimaliseren.
Uitvoerbaarheid: Hangt af van de keuze en uitvoering van voegen en wegdek.
Werking op het dB(A)-niveau: 0-3 dB op het piekniveau van het luchtgeluid afhankelijk van de verkleining. De grootste reductie is voor banden met de kleinste diameter te verwachten. Beperkt door minimale spleetopening.
Werking op het laagfrequent geluid: zeer beperkt.
Onderbouwing: Indien sprake is van een voegspleet, dan wordt de excitatiekracht op de banden verhoogd. Dit leidt vooral tot excitatie en geluidafstraling van de band, maar ook van het brugdek. Met spleetbreedte 0 verdwijnt het voeggeluid indien vlak.

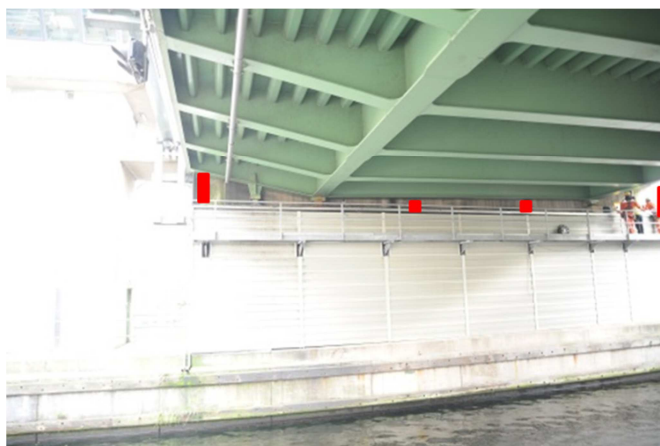
3. Maatregelen aan de brugconstructie

3a) Damping/ontdreuning van de brugplaatdelen die voeg- en rolgeluid afstralen: vooral de trogprofielen, maar eventueel ook het rijdek en het lijf van de hoofdliggers en dwarsliggers. Dit is mogelijk te optimaliseren aan de hand van de onderlinge bijdragen van plaatdelen van de onderkant van de brug, waarbij ook rekening kan worden gehouden met massatoename. Beperking tot de trogprofielen is naar verwachting voldoende om het A-gewogen niveau te reduceren.
Uitvoerbaarheid: Beperkt door de toelaatbare gewichtstoename van de val.
Werking op het dB(A)-niveau: 1-3 dB op het rol- en voeggeluid via de constructie, afhankelijk van de uitvoering.
Werking op het laagfrequente geluid: 1-2 dB indien zwaar uitgevoerd.
Onderbouwing: de dempingsverliesfactor van de trogprofielen is relatief laag en kan worden verhoogd, zoals te zien in de gemeten verliesfactoren. Wegens de hoge bijdrage van de trogprofielen in het totale geluid is te verwachten dat dit effectief is. Echter de andere componenten dragen ook bij en verdienen ook te worden gedempt. Voor laag frequent geluid zal een zwaardere dempingslaag nodig zijn, bijvoorbeeld een sandwichlaag.

3b) Verbeterde ondersteuning midden brugdek aan de oostkant en consoles aan de westkant
Vooraf de zakking in het midden van de rijbaan zou kunnen worden verminderd, waardoor de hele brug minder wordt aangestoten en eventueel het statisch en dynamisch hoogteverschil in de voeg bij de oostelijke voeg wordt verkleind. De brug is minder stijf aan de oostzijde dan de westzijde. De brug heeft daar 4 oplegpunten, 2 onder de hoofdliggers en 2 hulpopleggingen onder de consoles voor zware belasting, maar géén oplegpunten tussen de hoofdliggers. Extra oplegpunten met een stijve veer onder de brugrand tussen de hoofdliggers en onder de consoles kunnen zouden de dynamische verplaatsing bij lage frequenties kunnen reduceren. Zo wordt de hoofdlast gedragen door de oplegpunten onder de hoofdliggers, maar wordt de doorbuiging bij hoge belasting in het midden of op de consoles beter opgevangen. Een meting van de dynamische zakkingen langs de voegen aan zowel oost- als westzijde is aan te bevelen om dit beter te onderbouwen.
Uitvoerbaarheid: Dit wordt constructief uitvoerbaar geacht, echter de positionering, dimensionering en stijfheden behoeven aandacht in verband met de statisch overbepaalde oplegging.
Werking op het dB(A)-niveau: beperkt

Werking op het laagfrequent geluid: Mogelijk 3-6 dB voor passages van zware voertuigen. Dit verdient nadere verificatie middels metingen en eventueel modelberekeningen. Eigenfrequenties kunnen mogelijk hoger worden.

Onderbouwing: de randvoorwaarden veranderen waardoor de zakking van het brugdek wordt verminderd. Dit is vooral voor de excitatie van trilvormen van het brugdek bij lage frequenties van belang. Deingangsimpedantie wordt verhoogd waardoor minder trillingsenergie het brugdek ingaat. Lokale verdubbeling van deingangsimpedantie (dynamische stijfheid) leidt tot 6 dB minder ingaand vermogen, wat ook in de geluidafstraling tot uiting komt.



Figuur 45: Mogelijke verbetering van de brugoplegging ter vermindering van de dynamische zakking van het rijdek (rijstroken 2-4). De stijfste oplegging blijft bij de hoofdliggers; de extra oplegpunten dienen minder stijf te zijn maar voldoende om de zakking te reduceren, bijvoorbeeld door middel van elastische oplegplaten.

3c) Elimineren van speling in de oplegging

Bekend is dat er ca 4 mm speling in de hulpoplegging onder de consoles is, die wordt doorlopen bij passages van een zware voertuigen. Deze speling geeft mogelijk ook extra aanstoting van de hele brug en zou moeten worden voorkomen middels verbeterde elastische oplegging of vergrendelingen.

Uitvoerbaarheid: Elastische ondersteuning en speling opheffen is denkbaar, vergrendeling is ingewikkelder en veel duurder. Deze oplossing wordt door Rijkswaterstaat niet haalbaar geacht voor de bestaande brug. Bij een nieuwe brug zou een eis kunnen worden gesteld dat er geen brede consoles zijn die een dergelijke extra oplegging nodig hebben.

Werking op het dB(A)-niveau: onbekend, maar bij harde pieken zal de bijdrage in het dB(A)-niveau wat afnemen.

Werking op het laagfrequent geluid: Mogelijk 0-3 dB voor passages van zware voertuigen waarvoor speling wordt doorlopen (de hoogste niveaus).

Onderbouwing: Doorlopen van speling introduceert een extra kracht op het brugdek in vergelijkbare orde-grootte als het oprijden zelf.

3d) Verstijving van plaatvelden van het rijdek

Het rijdek is verstijfd door de hoofdliggers, dwarsliggers en trogprofielen. De hoofdliggers en hun verbindingsplaten met het rijdek zijn minder stijf uitgevoerd aan de open zijde van de val. Het oppervlak van het rijdek tussen de hoofd- en dwarsliggers is nog zo groot dat daar trilvormen met enige amplitude kunnen optreden rond 50 Hz. Daarnaast is doorbuiging van het hele middendek mogelijk te verminderen zodat ook bij de lagere frequenties minder geluidafstraling plaatsvindt. Additionele verstijving van deze plaatvelden zou deze frequentie kunnen verhogen en de amplitude verlagen waardoor minder laagfrequent geluid ontstaat. Met name is het mogelijk het impedantieverschil tussen de verstijfde en onverstijfde plaatdelen te reduceren door een betere verdeling van verstijvers.

Uitvoerbaarheid: Beperkt door gewicht; dient met SAO [5] of vergelijkbare berekening en eventueel dynamische FE berekeningen te worden onderzocht. De mogelijkheden op de bestaande brug zijn beperkt wegens constructieve ingreep.

Werking op het dB(A)-niveau: 3-6 dB afhankelijk van de uitvoering.

Werking op het laagfrequent geluid: 3-6 dB afhankelijk van de uitvoering

Onderbouwing: Gemiddeld wordt het ingaand vermogen in de brug verminderd als het rijdek gelijkmatiger wordt verstijfd. De afstraalfactor wordt echter ook beïnvloed.

3e) Vlakke deklaag op rijdek

Mogelijk kan de ruwheid van het wegdek op de brug worden verlaagd, waarmee het rolgeluid kan verminderen. Van het huidige deklaag zijn geen ruwheden bekend.

Uitvoerbaarheid: Beperkt uitvoerbaar in verband met eisen aan frictie bij vorst.

Werking op het dB(A)-niveau: 0-3 dB op het rolgeluid afhankelijk van de uitgangssituatie.

Werking op het laagfrequent geluid: Indien het hoogteprofiel te verbeteren is, is hier mogelijk ook wat reductie te bereiken.

Onderbouwing: de ruwheid van het wegdek op de brug en van de banden samen bepalen rechtstreeks de aanstoting van het brugdek.

3f) Isolatielaag tussen loopvlak en rijdek

Het loopvlak van het wegdek zou mogelijk kunnen worden geïsoleerd van het rijdek middels een slappere tussenlaag, die voldoende stijf is voor de belasting en remkrachten, maar de excitatie van het rijdek bij frequenties boven 500 Hz enigszins reduceert.

Uitvoerbaarheid: Lastig wegens veel eisen: belasting, remkrachten, duurzaamheid. Vereist R&D.

Werking op het dB(A)-niveau: 1-3 dB op het rolgeluid.

Werking op het laagfrequent geluid: geen.

Onderbouwing: Klassieke principe van trillingsisolatie.

3g) Perforatie van plaatvelden

Perforatie van trogprofielen en hoofd- en dwarsliggers is denkbaar voor een nieuwe brug. Dit is alleen mogelijk voor de verstijvende elementen en niet voor het rijdek. Perforatie wordt effectief vanaf rond 50% oppervlakte reductie, en moet dus zorgvuldig worden overwogen en berekend in een dragende constructie.

Een extreme vorm van perforatie is een vakwerkconstructie: slanke balken stralen in het algemeen minder goed geluid af.

Uitvoerbaarheid: Alleen voor een nieuwe brug, tenzij trogprofielen op de bestaande brug te vervangen zijn.
Werking op het dB(A)-niveau: 3-6 dB op middenfrequent geluid afgestraald door de brugconstructie.
Werking op het laagfrequent geluid: geen.
Onderbouwing: Akoestische kortsluiting treedt op tussen beide kanten van de plaatvelden.

4.3 Kansrijke maatregelen voor de bestaande brug

Op grond van de meetresultaten, het te verwachten effect van de individuele maatregelen en uitvoerbaarheid worden voor de bestaande brug kansrijke maatregelen aanbevolen die zijn opgesomd in tabel 7. Er wordt steeds het geschatte minimum (oftewel nu realistisch haalbaar) en het maximum effect op het ongewogen en op het A-gewogen geluiddrukkniveau en het globale effect op de hinder aangegeven. Verder is een inschatting gegeven van de totaal te behalen reductie voor de aangegeven maatregelcombinatie, waarbij een relatief grote spreiding in het geluidreducerend effect kan optreden.

Tabel 7: Kansrijke maatregelen voor de bestaande brug.

Maatregel	Effect dBLin	Effect dB(A)	Effect hinder
1b) Afscherming (isolatie) van onderkant en absorberende afscherming aan de zijde van de brug vanaf wegdek tot aan de doorvaarthoogte.	0-1	1-5	+
2a) Schuine of lange vingervoegen die de aanstoting van het brugdek reduceren en een vlakker verloop hebben.	1-3	1-3	+
2b) Afsluiting van voegen aan de onderzijde, vooral aan de oostkant.	0	1-3	+
2c) Uitlijning van de voegen en het wegdek: afhankelijk van de nog onbekende uitgangstoestand.	0-3	0-3	0/+
3a) Damping/ontdreuning van de brugplaatdelen, met name de trogprofielen.	1-2	1-3	+
3b) Verbeterde ondersteuning van het midden van het brugdek en de consoles aan de oostkant en indien nodig ook de westkant.	3-6	0	+
3c) Reduceren van speling in de (hulp) oplegging (mogelijk niet haalbaar)	0-1	0-3	+
Verwachte reductie totaal	3-7	3-8	+/++

Bij reducties op het equivalente A-gewogen niveau is er mogelijk een begrenzing tot rond 3 dB wegens de bijdrage van de rest van de weg. De reducties zijn het beste te realiseren dicht bij de brug, zoals de eerste en tweede woning.

De reductie van het laagfrequente geluid en daarmee gepaard gaande hinder komen tot uiting bij alle woningen in de directe omgeving van de brug. L_C-L_A niveaus dalen van 10-15 dB naar 7-12 dB of maximaal naar 3-8 dB.

Indien bij de bestaande brug de val zou worden vervangen, en de verstijver configuratie zou worden verbeterd, is met name voor de lagere frequenties een

verbetering mogelijk van 1-3 dB, afhankelijk van de mate waarin de constructie wordt gewijzigd.

4.4 Kansrijke maatregelen aan de nieuwe brug

Als een nieuwe brug naast de bestaande brug wordt gebouwd, zijn er veel meer mogelijkheden om geluidreducerende maatregelen integraal mee te nemen in het ontwerp. Hierbij kunnen enkele globale principes worden gehanteerd:

1. Reduceer de excitatiekrachten bij het oprijden van de brug middels schuine voegen en een egale ondersteuning van de hele brugrand, en voorkom potentiële speling tijdens passages van zware voertuigen.
2. Minimaliseer verschillen in de dynamische stijfheid en daarmee de doorbuiging en trillingsresponsie bij het oprijden en overrijden van de brug. Daarmee wordt het excitatieprofiel meer continu en worden slappere delen van het rijdek minder gauw in trilling gebracht. Dit is mogelijk door de stijfheid van het dek egaler te maken middels meer en beter verdeelde verstijvers.
3. Zorg dat de demping van de geluidafstralende delen zo hoog mogelijk is, door middel van composiet of sandwich constructies. Voor lage frequenties moeten deze zwaar worden uitgevoerd.
4. Minimaliseer het totaal geluidafstralende oppervlak en pas indien nog nodig, in het ontwerp geïntegreerde afscherming toe op componenten die sterk bijdragen zoals trogprofielen. Mogelijk kunnen ook (deel)constructies worden toegepast die een lagere afstraalfactor hebben zoals geperforeerde of vakwerkconstructies.

De kansrijke maatregelen voor de nieuwe brug zijn fysisch soortgelijke maatregelen als voor de bestaande brug, zij het dat ze ingrijpender en meer integraal kunnen worden doorgevoerd. Verbeterde verstijving van de brug is wel mogelijk, wat bij de bestaande brug bewerkelijk is. De maatregelen zijn in tabel 8 opgesomd, weer met indicatie van minimaal en maximaal haalbare reducties voor de individuele maatregelen en in combinatie. Daarbij geldt zoals bij de bestaande brug dat een relatief grote spreiding in het geluidreducerend effect kan optreden.

De maximale reductie in de buurt van woningen vlakbij de brug is theoretisch even hoog als hetgeen middels een betonnen viaduct haalbaar is, namelijk 10-15 dB reductie van het laagfrequente geluid, 7 dB reductie van het piekgeluid van de voegen en ca. 3 dB reductie van het rolgeluid afgestraald door de brugconstructie. Hiermee wordt de hinder aanzienlijk teruggebracht tot dat van de rest van de weg. De werkelijk haalbare reductie zal het resultaat zijn van optimalisatie van alle ontwerpparameters, kosten en uitvoerbaarheid.

Tabel 8: Kansrijke maatregelen voor de nieuwe brug.

Maatregel	Effect dBLin	Effect dB(A)	Effect hinder
1b) Afscherming (isolatie) van onderkant en absorberende afscherming aan de zijde van de brug vanaf wegdek tot aan de doorvaarthoogte.	0-1	1-5	+
2a) Schuine voeg die de aanstoting van het brugdek reduceert en een vlakker verloop geeft.	1-5	1-3	+
2b) Afsluiting van voegen aan de onderzijde, vooral aan de oostkant.	0	1-3	+
2c) Uitlijning van de voegen en het wegdek: afhankelijk van de nog onbekende uitgangstoestand.	0-3	0-3	0/+
3a) Integrale demping/ontdreuning van alle brugplaatdelen.	1-2	1-3	+
3b) Verbeterde ondersteuning van het midden van het brugdek en de consoles aan de oostkant en indien nodig ook de westkant.	3-6	0	+
3c) Speling voorkomen door vermijden extra opleggingen voor brede consoles (eventuele eis)	0-1	0-3	+
3d) Verstijving van plaatvelden van het rijdek met akoestische optimalisatie.	3-6	3-6	++
Verwachte reductie totaal	5-15	3-10	++

5 Conclusies

De huidige situatie van de noordelijke Schinkelbrug is gekarakteriseerd voor wat betreft de hinderbepalende geluidemissie. Daarnaast is onderzocht welke geluidreducerende maatregelen effectief kunnen zijn voor de bestaande brug en een nieuwe brug naast de huidige, en is een inschatting gemaakt van de mogelijke geluidreductie en hinder in de nieuwe situatie.

Metingen bij ontvangpunten en hinder

De hinder bij de woningen vlak naast de brug bij M1 en langs de sluis wordt bepaald door zowel het vaak impulsief laagfrequente geluid onder 125 Hz van een deel van de zware en middelzware voertuigpassages, als door het rol- en voeggeluid van de brug, dat vooral afkomstig is door lichtere voertuigen wegens hun hogere aantallen en rijsnelheden. Woningen op iets grotere afstand zoals bij M2 en M3 hebben vergelijkbaar laagfrequent geluid als bij M1 en iets lagere dB(A)-niveaus ten gevolge van het geluid van de brugvoegen en het brugwekdek, die steeds minder bijdragen met toenemende afstand en smallere hoek ten opzichte van de weg.

De niveaus bij alle ontvangpunten zijn voldoende hoog om substantiële hinder te veroorzaken, met momentane L_C - L_A niveaus van rond de 15 dB en L_C piekniveaus van boven de 80 dB. Overdag kunnen rond 50-100 laagfrequente pieken per uur optreden die bij alle woningen goed hoorbaar zijn. Hoewel 's nachts minder zware voertuigen rijden is er desondanks hinder omdat het achtergrondniveau lager is en incidentele passages van zware voertuigen meer opvallen in de kleinere verkeersstroom.

Afstraling van de brug en brugtoeslag

De onderzijde van de brug straalt het meeste voeg- en rolgeluid af doordat het niet afgeschermd is, een grote, matig gedempte afstralende constructie heeft en doordat de tunnel het geluid versterkt. Het geluidscherm op de brug heeft beperkt effect vanwege de hoge bijdrage van de onderzijde. De brugtoeslag is 10-15 dB onder 63 Hz, aflopend naar 0 dB rond 2 kHz.

Bevindingen uit geluid- en trillingsmetingen onder de brug

De geluidmetingen onder de brug vertonen hoge niveaus tussen 16 en 125 Hz, die ook bij de ontvangpunten optreden. In de trillingsmetingen zijn duidelijke eigenfrequenties van de brugcomponenten terug te zien. Punten aan de oostkant van de val vertonen een resonantie bij 32 Hz, samen met het rijdek aan de westkant en de hoofdligger in dwarsrichting. De rijdek consoles resoneren sterk rond 16-20 Hz samen met de rijdek middenplaten. De dwarsliggers vertonen een resonantie rond 50 Hz. Het rijdek met consoledekken, hoofd- en dwarsliggers hebben alle laagste eigenfrequenties en de hoogste trillingsresponsie tussen 16 en 125 Hz. Vanaf 160 Hz hebben de trogprofielen de hoogste trillingsresponsie en resonanties.

Berekende en gemeten eigenfrequenties van zowel de luchtvolume onder de brug (16/20/28 Hz) als van het brugdek (15 Hz), dekdelen (29 Hz), hoofdliggersecties (23 Hz), dwarsliggers (14 Hz) en trogprofielen (163 Hz) zijn goed terug te vinden in de meetresultaten.

De eigentrilvormen van rijdek, hoofdligger secties en dwarsliggers bewegen in richtingen die de akoestische eigentrilvormen kunnen aanstoten:

- rijdek verticaal: 15 en 29 Hz, akoestisch in hoogterichting 28 Hz;
- hoofdliggersecties dwars: 23 Hz, akoestisch in langsrichting 20 Hz;
- dwarsliggers dwars: 14 Hz, akoestisch in breedterichting 16 Hz.

Hierdoor kan er bij lage frequenties een sterke koppeling tussen brugtrillingen en akoestische resonanties van de tunnelruimte optreden.

Het geluidvermogen is uit de gemeten trillingen, afstraalfactoren en totale oppervlak van de brugcomponenten berekend en toont aan dat onder 125 Hz de sterkste bijdrage afkomstig is van:

- het rijdek (midden- en consoleplaten) bij 16-63 Hz;
- de hoofdliggers bij 32 en 80 Hz;
- de dwarsliggers bij 50 en 100 Hz.

Boven 125 Hz is de bijdrage van de trogprofielen grotendeels dominant, behalve bij 600-800 Hz waar het rijdek ook bijdraagt.

Uit de dempingsmeting volgt dat de verschillende componenten matig gedempt zijn, vergelijkbaar met andere bruggen. De trogprofielen zijn lichter gedempt.

Uit analyse van een aparte autopassage is te zien dat het oprijden van de brug het meeste geluid produceert. Bij middelzware en zware voertuigen kan het laagfrequente geluid gedurende de hele passage hoog zijn.

Antennemetingen bevestigen dat de onderkant van de brug dominant is voor het hele frequentiegebied en dat de linker deel van het brugdek het sterkst geluid afstraalt tijdens het oprijden van zowel auto's als overige voertuigen.

Geluid- en hinder reducerende maatregelen

De laagfrequente hinder bij de meeste woningen in de directe omgeving van de brug kan worden gereduceerd, zowel wat betreft het equivalente niveau als de laagfrequente geluidspieken. Gegeven de bijdrage van de resterende weggedeeltes aan weerszijden van de brug zal de reductie op het equivalente niveau bij woningen tot ca. 3 dB beperkt zijn, afnemend met grotere afstand tot de brug. Wel kan een grote reductie op het piekgeluid van de voegen worden bereikt dat de hinder in de buurt van de brug, vooral loodrecht op de brug, zal reduceren. In ieder geval kan de hinder ten gevolge van de brug worden verminderd ten opzichte van de huidige situatie.

Voor de bestaande brug is een lijst kansrijke maatregelen voorgesteld die van 3 tot 7 dB in het ongewogen geluidniveau en 3 tot 8 dB reductie in het dB(A)-niveau kan opleveren. Deze maatregelen omvatten:

- Verbeterde ondersteuning van het midden van het brugdek en de consoles aan de oostkant en indien nodig ook de westkant;
- Demping/ontdreuning van de brugplaatdelen, met name de trogprofielen;
- Kapseling van de onderkant of absorberende afscherming aan de zijde van de brug vanaf wegdek tot aan de doorvaarthoogte, eventueel geïntegreerd met het aanwezige beweegbare geluidscherm;
- Lange vingervoegen die de aanstoting van het brugdek reduceren en een vlakker verloop hebben;

- Afsluiting van voegen aan de onderzijde;
- Hoogte-uitlijning van de voegen en het wegdek.

Voor de nieuwe brug worden soortgelijke maatregelen aanbevolen, echter meer in het ontwerp geïntegreerd en met verbeterd ontwerp van de verstijverconfiguratie met het oog op reductie van de excitatie van de brug. Daarnaast kan een schuine voeg worden toegepast. Met al deze maatregelen worden reducties verwacht van 5 tot 15 dB in het ongewogen niveau en 3 tot 10 dB in het dB(A)-niveau. Ook hier geldt weer dat de werkelijke dB(A)-reductie bij woningen wordt beperkt tot rond de 3 dB door het overige geluid van de snelweg.

De laagfrequente hinder in de nieuwe situatie is terug te brengen tot onder het huidige, als de 'maximale' combinatie van maatregelen optimaal wordt uitgevoerd. Voor het dB(A)-niveau kan een niveau worden bereikt dat vergelijkbaar is met de overige wegdelen, waarbij verkeerstoename toch weer tot een verhoging kan leiden.

De detaillering van de voorgestelde maatregelen vereist nadere uitwerking en optimalisatie, met geluidtechnische begeleiding van de uitvoeringsaspecten.

6 Referenties

- [1] Ph. H. van den Dool, Meet- en Rekenvoorschrift geluidemissie beweegbare bruggen, Onderzoek naar de geluidhinder bij bruggen, Movares Nederland B.V., Kenmerk MNO-VDD-110020014 - Versie 1.0, 8 december 2011.
- [2] DO Schinkelbruggen Staalconstructie sterkteberekeningen van het val, Dienst Bouw Rijkswaterstaat, 18 juli 2006.
- [3] Geluideisen voegovergangen, Rijkswaterstaat, Documentnummer RTD1007-3, Uitgave 26 maart 2013.
- [4] R. D. Blevins, Formulas for Natural Frequency and Mode Shape, Krieger Publishing, Edition 2001.
- [5] M.G. Dittrich: SAO software user manual, TNO 1990.
- [6] M.H.A. Janssens, D.J. Thompson, Rekenmodel voor geluid van stalen spoorbruggen – Ontwikkelingen 1992-1993, TNO rapport TPD-HAG-RPT-93-0151, 11 november 1993.
- [7] D.J. Thompson: Railway Noise and Vibration, Elsevier 2009.

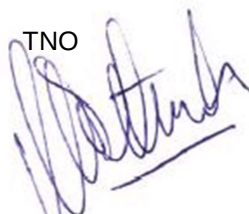
7 Ondertekening

Den Haag, januari 2016

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'C.M. Ort', written over a horizontal line.

Drs. C.M. Ort
Research Manager

TNO

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'M.G. Dittrich', written over a horizontal line.

Ir. M.G. Dittrich
Auteur

Bijlage A Apparatuurlijst

			Meetmiddel	Merk	Type	Serialnr.	tuinnummer	Naam
IJbron laatste meting			Calibrator	B&K	4231	1858995	33000347	
M1		M1	Microphone	B&K	4189	2643099	33080946	"Charlie"
M14		M14	Microphone	B&K	4192	2906097	60141573	
			Data acquisitie	B&K	LANXI-3160-A-042	100398	33101667	"Middelburg"
Radar			Radarmeetsysteem	HIG	HIG Traffic Radar			
Video			Video	GoPro	4			
M2/M3			Data acquisitie	B&K	4192	2906101	60141576	
		M2/M3	Microphone	B&K	LANXI-3050-A-060	108064	60140689	"Rosberg"
M10/M13	bos	M10	Microphone	B&K	4192	2906103	60141577	
		M13	Microphone	B&K	4192	2906099	60141574	
			Data acquisitie	B&K	LANXI-3050-A-060	105058	33101667	"Lauda"
M4/M5/M5		M4	Microphone	B&K	4192	2906100	60141575	
M15/M16		M5	Microphone	B&K	4192	2569917	33060256	
		M6	Microphone	B&K	4192	2569915	33060254	
		M15	Microphone	B&K	4192	2569914	33060253	
		M16	Microphone	B&K	4192	2458899	33008126	
			Data acquisitie	B&K	LANXI-3050-A-060	105056	33101665	"Fangio"
A1 - A11		A1	Accelerometer	B&K	5958	2056237	33001361	
		A2	Accelerometer	B&K	5958	2056240	33007931	
		A3	Accelerometer	B&K	5958	30381	60141530	
		A8	Accelerometer	B&K	5958	2056232	33001374	
		A9	Accelerometer	B&K	5958	2056240	33007931	
		A10	Accelerometer	B&K	5958	30510	60141531	
		A11	Accelerometer	B&K	5958	2056239	33006916	
			Data acquisitie	B&K	LANXI-3050-A-060	108082	60140688	"MAX"
			Calibrator	B&K	4294	2559614	33070372	

Bijlage B Tabellen van spectra

Tabel B1: Brugtoeslag CW1 en CW2 in octaafbanden.

Frequentie [Hz]	8	16	32	64	125	250	500	1k	2k	4k	8k
C _{W1}	4,7	12,2	11,3	6,9	5,9	2,5	0,9	-0,3	-1,2	-4,7	-6,1
C _{W2}	3,8	15,2	14,8	7,2	8,2	4,3	3,0	1,8	0,6	-3,5	-6,7

Tabel B2: Ongewogen geluidimmissiespectra $L_{\text{peq,1h}}$ bij woningen in éénderde octaafbanden, in dB.

Freq. [Hz]	M14 16-17:00	M14 10-11:00	M1 16-17:00	M1 10-11:00	M2 16-17:00	M3 10-11:00
10	79,9	79,2	61,6	63,4	58,6	63,1
12,5	78,0	77,7	65,3	67,4	60,8	65,7
16	85,1	86,3	72,1	75,5	65,3	72,0
20	85,9	86,7	66,7	69,8	63,6	67,8
25	83,8	85,2	67,4	71,3	67,9	69,1
31,5	85,2	86,7	65,1	68,2	65,4	67,7
40	83,3	84,8	64,6	67,4	63,6	63,9
50	82,1	83,3	62,9	65,0	63,0	62,8
63	82,2	82,9	64,7	66,2	61,6	63,0
80	81,2	81,6	63,6	64,9	59,2	60,6
100	79,9	79,4	60,5	61,2	58,8	59,6
125	79,2	79,4	59,1	60,4	58,0	58,8
160	79,0	79,1	58,4	60,3	57,8	57,2
200	77,5	77,5	57,8	58,2	57,0	55,6
250	75,3	75,4	56,5	56,7	55,3	53,8
315	73,7	74,4	56,2	56,5	54,2	53,0
400	74,7	75,3	55,7	56,6	54,0	53,4
500	79,2	79,9	56,3	57,0	54,4	53,2
630	82,0	82,4	57,4	57,8	55,6	54,7
800	82,5	82,5	58,4	58,1	56,2	55,2
1000	82,1	81,4	57,5	57,4	55,0	53,6
1250	80,1	79,3	55,0	54,9	53,1	51,3
1600	77,0	76,2	51,5	51,8	51,1	48,1
2000	72,7	72,0	47,8	47,8	48,8	45,1
2500	68,8	68,2	44,5	44,5	46,8	42,3
3150	65,6	65,1	41,3	41,8	44,2	39,4
4000	62,6	62,1	38,7	39,1	42,2	36,9
5000	59,8	59,5	35,8	36,6	39,3	32,5
6300	57,8	57,6	33,6	33,9	39,4	29,8
8000	57,2	57,1	29,9	30,0	39,3	28,7
10000	58,1	57,5	26,0	27,2	39,5	26,5

Tabel B3: Ongewogen geluidmissiespectra $L_{\text{peq,1h}}$ in éénderde octaafbanden, in dB, bij referentiepunt M10 en nabij gelegen punt M13 boven scherm, bij brugwachtershuis M14, en naast de brug aan de kade op meethoogtes -3m, 0m en +3m ten opzichte van het wegdek.

Freq.[Hz]	M10 (ref)	M13	M14	M4 (-3m)	M5 (0m)	M6 (+3m)
10	79,5	70,7	67,9	75,5	73,6	75,2
12,5	77,7	71,1	69,6	77,6	75,5	73,5
16	86,5	71,9	70,2	87,3	83,6	85,2
20	86,6	70,9	70,6	86,9	84,2	82,9
25	84,3	70,1	69,3	88,1	85,0	82,6
31,5	86,6	70,9	71,4	86,1	84,9	83,6
40	85,0	73,4	72,1	82,1	82,7	81,4
50	83,7	75,2	74,0	79,5	82,4	81,3
63	83,0	71,8	72,0	81,0	80,8	78,0
80	81,4	70,2	68,5	77,6	76,7	75,7
100	79,6	70,1	66,9	73,1	73,6	72,6
125	79,6	68,8	65,9	75,1	74,4	72,3
160	79,2	68,5	65,0	75,4	75,0	71,8
200	77,6	69,1	65,2	70,2	69,1	68,6
250	75,4	68,9	65,1	70,2	69,4	68,5
315	74,1	69,3	65,6	70,3	69,4	68,1
400	75,2	69,4	65,4	70,8	69,7	68,3
500	79,9	71,8	67,3	70,5	69,3	68,5
630	82,2	75,4	69,9	71,6	70,6	69,6
800	82,3	77,1	71,0	72,7	71,5	70,4
1000	81,8	73,1	69,2	71,4	70,0	69,4
1250	79,7	70,1	67,1	69,4	67,7	67,4
1600	76,5	67,3	64,3	65,5	63,6	63,5
2000	72,1	64,8	61,4	61,6	60,4	59,8
2500	68,2	62,2	58,1	56,9	55,8	55,3
3150	65,2	59,8	55,7	52,9	52,0	51,6
4000	62,2	57,5	53,2	49,3	48,5	48,1
5000	59,4	55,2	50,5	46,1	45,2	44,9
6300	57,5	53,9	48,5	44,1	43,4	44,1
8000	56,8	53,7	48,0	41,5	41,0	43,0
10000	57,2	55,5	48,4	41,1	40,9	41,6